

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**



PROYECTO FINAL DE CARRERA

**DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD
TÉRMICA EN NANOHILOS MEDIANTE
EFECTO FOTOACÚSTICO.**

**AUTOR: David Solís Martín
TUTOR: Armando Fombella Cuesta
DIRECTOR: Pablo Díaz Chao**

Octubre de 2010

*El talento en buena medida,
es cuestión de insistencia.
(Anónimo)*

Agradecimientos

A mis padres, por su incondicional apoyo durante estos años tanto en los buenos como en los malos momentos.

A mi tutor por prestarse como guía en esta etapa de transición entre lo educativo y lo profesional.

A los miembros del Instituto Madrileño de Microelectrónica que me han brindado esta oportunidad y sin los cuales este proyecto nunca habría visto la luz.

A todos ellos, gracias.

Resumen:

El presente proyecto, tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema de instrumentación electrónico, capaz de determinar la conductividad térmica de nuevos materiales, mediante el efecto fotoacústico.

La medición fotoacústica se enmarca dentro de los análisis no destructivos y presenta una clara ventaja en la medición de matrices nanoestructuradas dado que no precisa de contacto mecánico con la muestra.

La celda fotoacústica desarrollada se ha optimizado acorde al objetivo de hacer mediciones tanto en matrices de nanohilos como para láminas delgadas crecidas en multicapas. El sistema de instrumentación es capaz tanto de regular la exposición lumínica de la muestra, como de recoger las señales acústicas del sistema. Todo el dispositivo está conectado a un ordenador de control desde donde se gobiernan y monitorizan los diferentes instrumentos mediante el entorno gráfico LabView. Finalmente, y con el objetivo de procesar los datos se utiliza el entorno matemático Mathematica.

El proyecto se enmarca dentro de la línea de investigación, *Nano-engineered high performace Thermoelecric Energy devices*, desarrollada en el Instituto Madrileño de Microelectrónica (IMM), perteneciente al CSIC, y que tiene como principal objetivo el desarrollo de dispositivos termoeléctricos de alto rendimiento.

Abstract

The aim of this project is to design and to implement an electronic instrumentation system capable of determining the thermal conductivity of new materials, by means of the photoacoustic effect. The photoacoustic method provides a non-destructive analysis of these materials, having a clear advantage in the measurement of nanostructured arrays because it does not require mechanical contact with the samples. In the framework of this project, a photoacoustic cell has been designed and optimized, according to a clear objective: being able to make measurements on nanowire arrays, multilayers and thin films grown in those multilayers. The instrumentation system is capable of regulating both the light exposure of the sample, and to collect the acoustic signals that are produced in the sample as a consequence of the heating provided by the light. The entire device is connected to a control computer, from which one can govern and monitor the various instruments through a LabView graphical environment. Finally, in order to manipulate the physical equations and process the data, the mathematical environment Mathematica has been used. This project is part of a more ambitious research, focused on the developement of nano-engineered high performace Thermoelecric Energy devices, which is being carried out at the Madrid Institute of Microelectronics (IMM - CSIC).

Índice general

Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Índice General.....	7
Índice de Figuras.....	9
Índice de ecuaciones.....	10
Motivación y objetivos.....	11
1.Introducción.....	14
2.Estado del arte.....	18
2.1 Historia del efecto fotoacústico.	
2.2 Principios de la fotoacústica y técnicas de detección.	
2.2.1 Cámara fotoacústica abierta .	
2.2.2 Cámara fotoacústica cerrada.	
2.3 Modelo normal de generación fotoacústica.	
2.4 Modelos extendidos.	
2.4.1 Teoría fotoacústica para materiales multicapa.	
3.Desarrollo.....	27
3.1 Modelo matemático del efecto fotoacústico.	
3.2 Diseño de la celda fotoacústica.	
3.2.1 Comparativa de longitud de onda acústica $\lambda_s / 2$ en todos los gases:	
3.2.3 Imágenes del dispositivo físico final.	
3.3 Instrumentación.	
3.3.1 Protocolo de funcionamiento:	
3.3.2 Diseño de hardware para conexión de dispositivos.	
3.3.2.1 Cálculo de R_3 para control de ganancia.	
3.3.2.2 Cálculo de la etapa de filtrado.	
3.3.2.2.1 Filtro de entrada paso alto.	
3.3.2.2.2 Filtro de salida paso bajo	
3.3.3 Análisis informático del comportamiento del sistema.	
3.3.4 Diseño del circuito impreso PCB.	
3.4 Representación del cableado del sistema completo.	

3.5 Desarrollo de programa de instrumentación virtual.	
3.5.1 Panel de control.	
3.5.2 Osc Sweeps	
3.5.3 Curve Buffer.	
3.6 Desarrollo de programa de análisis matemático.	
3.7 Calibración del sistema.	
 4.Resultados experimentales.....	53
4.1 Resultados experimentales del lock-in	
4.2 Capturas gráficas de las mediciones experimentales.	
4.2.1 Macor	
4.2.2 Acero AISI 304	
4.2.2 Alúmina.	
4.2.3 Cartón óptico de alta absorbancia.	
 5.Aportaciones.....	60
6.Trabajos futuros.....	62
7. Presupuesto.....	64
 Referencias.....	66
 Anexos.....	67
ANEXO A : Evaluación longitud máximo para la cámara fotoacústica en función del gas interior.....	69
ANEXO B: Planos de fabricación de la celda fotoacústica.....	74
ANEXO C : Manual de modificaciones del programa LabView para la gestión del amplificador Lock-in Signal Recovery 7270.....	75
ANEXO D . Programa de cálculo matemático para resolución de las ecuaciones del modelo de XU.....	85
ANEXO E Catálogo micrófono: SPM0408HE5H.....	89
ANEXO F . Adaptador para fibra óptica.....	92
ANEXO G . Catálogo del Lock-in Signal Recovery 7270.....	93
ANEXO H Catálogo láser.....	99

Índice de figuras

- Figura 1: Matriz de nanohilos de 50 nm de Bi_2Te_3 .*
- Figura 2 :Nanohilos de 200 nm de $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ crecidos mediante electro-deposición en alúmina porosa.*
- Figura 3: Modelo de celda fotoacústica abierta.*
- Figura 4: Modelo de celda fotoacústica cerrada*
- Figura 5: Modelo de celda fotoacústica de Rosencwaig*
- Figura 6: Modelo de celda fotoacústica de Xianfan Xu*
- Figura 7: tabla comparativa de gases propuestos*
- Figura 8: Gráfica comparativa entre gases*
- Figura 9: Vista superior de la celda*
- Figura 10: Vista inferior de la celda*
- Figura 11: Esquema del sistema de instrumentación.*
- Figura 12: Micrófono MENS SPM0408HE5H*
- Figura 13: Amplificador Lock-in SR 7270*
- Figura 14: Láser Alphaslabs LD-10*
- Figura 15 : Esquema eléctrico del micrófono*
- Figura 16: Esquema eléctrico del micrófono y la etapa de filtrado*
- Figura 17: Esquemático OrCad del circuito completo*
- Figura 18: Diagramas de Bode de ganancia y frecuencia de paso*
- Figura 19: Capa TOP del PCB*
- Figura 20: Capa botton del PCB*
- Figura 21: imagen del circuito implementado*
- Figura 22: Esquema de cableado del sistema completo.*
- Figura 23: Imagen del montaje realizado en el laboratorio.*
- Figura 24: Panel de control Lock.in en LabView.*
- Figura 25: Control del oscilador en LabView.*
- Figura 26: Curve buffert en LabView.*
- Figura 27: Esquema general del programa matemático.*
- Figura 28: Montaje experimental para verificación del sistema.*
- Figura 29: Curva de fase para Macor.*
- Figura 30: Curva de amplitud para Macor.*
- Figura 31: Curva de fase para AISI 304*
- Figura 32: Curva de amplitud para AISI 304*
- Figura 33: Curva de fase para alúmina*
- Figura 34: Curva de amplitud para alúmina.*
- Figura 35: Curva de fase para cartón óptico*
- Figura 36: Curva de amplitud cartón óptico*
- Figura 37: Esquema del sistema completo con medidor de luz reflejada*

Índice de ecuaciones

- 1) *Intensidad del haz luminoso*
- 2) *Fluctuación de la temperatura del gas*
- 3) *Valor de θ en la ecuación de fluctuación de la temperatura del gas*
- 4) *Relación matemática dentro del modelo.*
- 5) *Relación matemática dentro del modelo*
- 6) *Relación matemática dentro del modelo*
- 7) *Relación matemática dentro del modelo*
- 8) *Relación matemática dentro del modelo*
- 9) *Difusividad térmica del medio.*
- 10) *Diferencial de presión creado por el pistón adiabático.*
- 11) *Distribución de la temperatura entre capas*
- 12) *Relación matemática del término B_{n+1}*
- 13) *Diferencial de presión dentro de la cámara.*
- 14) *Distribución de la temperatura entre capas*
- 15) *Relación matemática del término B_{n+1}*
- 16) *Distribución de la fluctuación de la temperatura dentro de cada capa*
- 17) *Distribución de la fluctuación de la temperatura dentro de cada capa*
- 18) *Coeficientes de los vectores que conforman la matriz (16)*
- 19) *Coeficientes de los vectores que conforman la matriz (16)*
- 20) *Coeficientes de los vectores que conforman la matriz (17)*
- 21) *Coeficientes de los vectores que conforman la matriz (17)*
- 22) *Relación matemática dentro del modelo*
- 23) *Relación matemática dentro del modelo*
- 24) *Relación matemática dentro del modelo*
- 25) *Relación entre desfase y argumento de B_{N+1}*
- 26) *Longitud de onda del sonido en un gas.*
- 27) *Velocidad del sonido en un gas.*
- 28) *Fluctuación de la temperatura de la columna de gas*
- 29) *Difusividad térmica del medio*
- 30) *Relación matemática entre (27) y (28)*
- 31) *Tensión de salida para amplificador operacional no inversor.*
- 32) *Ganancia en tensión del amplificador, expresada en dB.*
- 33) *Frecuencia de corte filtro paso alto*
- 34) *Frecuencia de corte filtro paso bajo*

Motivación y objetivos

El desarrollo de materiales, tanto a nivel químico como estructural, obliga al uso de nuevas técnicas de medida para su caracterización.

Las medidas clásicas de conductividad térmica, basadas en el contacto físico con la muestra, se quedan obsoletas cuando se intentan aplicar a estructuras como las matrices de nanohilos, donde se antoja imposible una medición precisa dado su tamaño nanométrico y su disposición en estructuras ordenadas de miles de ellos.

El objetivo de este proyecto, es el desarrollo de un sistema instrumental, capaz de medir la conductividad térmica en matrices de nanohilos y otros formatos como láminas delgadas o muestras en volumen.

Para ello se ha recurrido a técnicas de medición indirectas, basadas en propiedades de la materia, como es el efecto fotoacústico.

Este fenómeno nos permite caracterizar de una forma no destructiva las matrices anteriormente mencionadas de una forma limpia y sin necesidad de contacto mecánico.

Los objetivos generales del proyecto serán por tanto:

- Análisis de la teoría fotoacústica y sus diferentes formas de aplicación.
- Deducción del modelo matemático para matrices nanoestructuradas y muestras en multicapas.
- Diseño de una celda fotoacústica adecuada para la naturaleza de las muestras.
- Diseño del sistema instrumentación el cual será capaz de:
 - Gobernar el láser y el chopper asociado a él.
 - Adquirir las señales acústicas captadas por el micrófono.
 - Aislar las señales de referencia y hacer una comparación entre ellas.
 - Multiplexar y exportar los resultado obtenidos al pc de control.
- Automatización del sistema mediante el interface gráfico LabView.

- Desarrollo de un sistema de cálculo capaz de procesar los datos matemáticamente para la determinación de las variables perseguidas.
- Implementación física del sistema, puesta en marcha y calibración.

1. Introducción

Sin duda uno de los grandes debates que está marcando el comienzo del siglo XXI, es la sostenibilidad del actual modelo energético mundial. El incremento en la demanda mundial de energía está creando problemas tanto políticos como sociales a escala mundial, amen de un impacto ambiental difícilmente enmendable. Es por ello que la industria está viviendo una convergencia hacia la optimización de los sistemas de producción energéticos clásicos, así como un desarrollo de nuevas tecnologías para el uso de fuentes energéticas más limpias y abundantes.

Un buen ejemplo optimización, es la reutilización del calor residual para su transformación en energía útil. Procesos y dispositivos de nuestra vida cotidiana, desprenden ingentes cantidades de energía calorífica residual, que habitualmente se disipa en el ambiente.

Los tubos de escape de los coches, las chimeneas industriales o los condensadores de los equipos de refrigeración, son claros ejemplos de pérdidas energéticas en forma de calor, energía que podría ser recuperada a partir de dispositivos capaces de convertir el calor en electricidad. Estos dispositivos son conocidos como termoelectricos (TE).

Desde hace más de cincuenta años, la industria ha desarrollado y utilizado sistemas de generación eléctrica a partir de dispositivos TE.

Su alta fiabilidad y bajo mantenimiento, han permitido que sean utilizados en sistemas tan complejos y sofisticados como la sonda espacial Voyager, la cual fue lanzada al espacio en 1977 [\[1\]](#) y aun a día de hoy sigue operativa, gracias a un sistema de alimentación TE basado en la desintegración de radioisótopos.

Podemos también encontrar dispositivos de uso cotidiano, como los termopares, usados en medición de temperatura o las células Peltier, utilizadas como generadores de frío en neveras portátiles.

Pero indiscutiblemente el talón de Aquiles de esta tecnología es su bajo rendimiento, en relación a los sistemas de producción energética clásicos. Este parámetro viene directamente relacionado con la figura de mérito (ZT), que se define como $ZT = (S^2\sigma T)/\kappa$ ¹. Es por ello, que para lograr un buen material termoelectrico, debemos maximizar su conductividad eléctrica, minimizando así las pérdidas por efecto Joule, lograr un alto coeficiente Seebeck, que determinará la capacidad de conversión de

¹ Dónde S , σ , κ , y T son el coeficiente Seebeck, la conductividad eléctrica, la temperatura absoluta y la conductividad térmica, respectivamente

energía del material y minimizar la conductividad térmica, garantizando diferencias de temperaturas en los extremos del TE [2].

Predicciones teóricas formuladas por Hicks y Dresselhaus en 1993 sugieren que la eficiencia termoeléctrica podría ser aumentada por el confinamiento cuántico de los portadores de carga electrónicos cuando se lleva a estos semiconductores a la nanoescala.[3,4] Pese a que un dispositivo con un alto ZT aún ha de ser demostrado, estas predicciones ya se han demostrado y han estimulado un gran interés en materiales termoeléctricos complejos.

La línea de investigación, *Nano-engineered high performace Thermoelecric Energy devices*, desarrollada en el Instituto Madrileño de Microelectrónica (IMM-CSIC), en la que se enmarca este proyecto, tiene como principal objetivo la mejora de las propiedades termoeléctricas de ciertos materiales a partir de los estudios de Dresselhaus.

Planteando las matrices de nanohilos como configuración más óptima en la mejora de las propiedades termoeléctricas, y como estructura más robusta para las aplicaciones industriales.

Como el lector habrá podido observar, una sustancial mejora en el ZT de estos dispositivos, abriría una puerta a la recuperación de energía y a la optimización de sistemas clásicos con grandes residuos térmicos, minimizando así, tanto su impacto ambiental (CO_2), como su coste económico.

Para mejorar la comprensión de los modelos estructurales de las muestras desarrolladas, se muestran algunas imágenes tomadas mediante microscopio electrónico de barrido SEM.

La primera imagen se corresponde a una matriz de nano hilos fabricada mediante la electro deposición de telurio de bismuto (Bi_2Te_3), el cual se trata de uno de los materiales de fabricación de dispositivos termoeléctricos más comunes y comerciales actualmente.

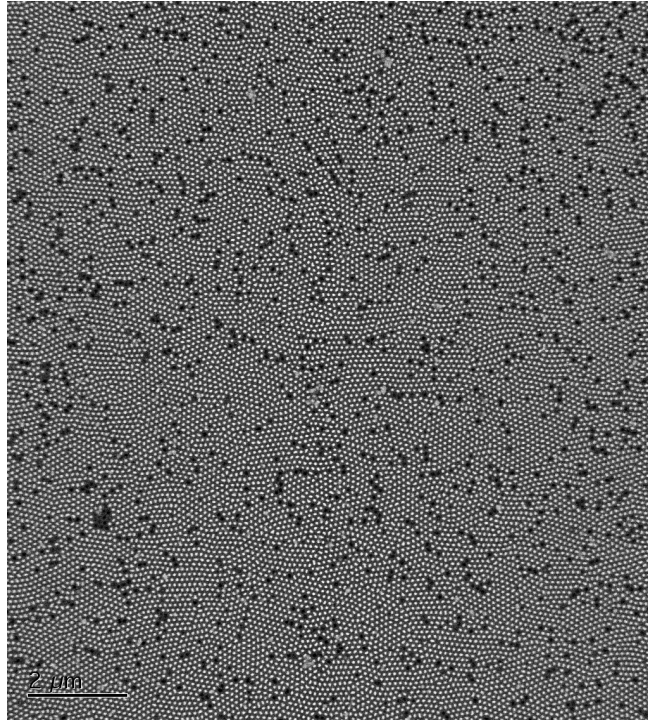
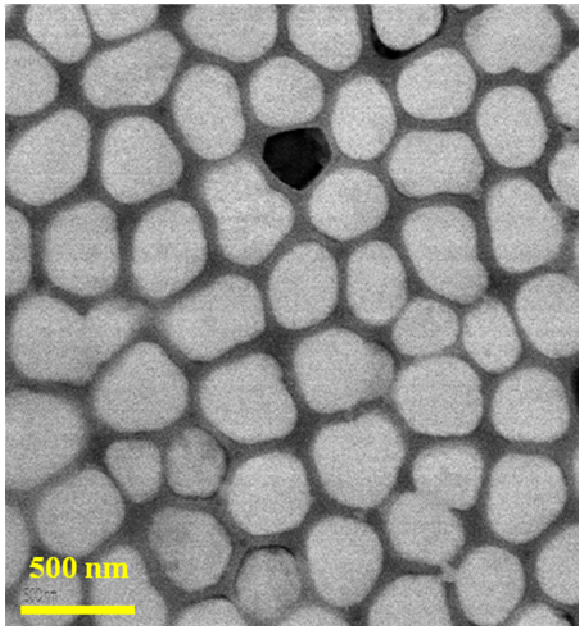
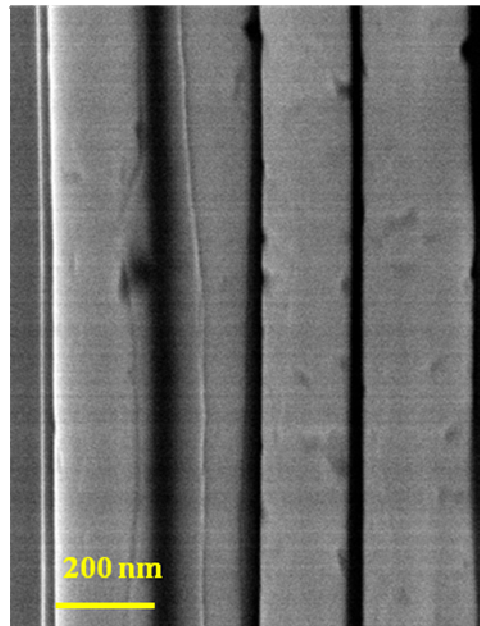


Figura 1: Matriz de nanohilos de 50 nm de Bi_2Te_3 .

La siguiente imagen de SEM, muestra la planta y perfil de una matriz de nano hilos crecidos en una plantilla de alúmina porosa, usando como material termoeléctrico antimonio de bismuto $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ material con el que se está investigando para mejorar las propiedades termoeléctricas de los dispositivos.



a) planta



b) perfil

Figura 2 : Nanohilos de 200 nm de $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ crecidos mediante electro-deposición en alúmina porosa.

2. Estado del arte

A continuación se introducirá al lector en las diferentes disciplinas que abarca este proyecto, presentándole para cada una de ellas los conceptos básicos, generalidades, clasificaciones, diseños de interés y explicación detallada para cada apartado expuesto, con el fin de que la lectura del Proyecto de Fin de Carrera pueda realizarse sin dificultad, incluso para aquellos que nunca hayan tratado con los temas aquí abordados.

2.1 Historia del efecto fotoacústico.

La fotoacústica puede ser definida como la generación de ondas acústicas en un medio que absorbe radiación en forma modulada o pulsada.

En 1880, A. G. Bell [\[5\]](#) descubrió el efecto fotoacústico cuando observó que al incidir luz de sol intermitente sobre un material absorbente, se producía un sonido audible. Bell utilizó este descubrimiento, para el fonógrafo, dispositivo capaz de transmitir voz usando luz solar como señal portadora y que se constituyó como la primera patente en telefonía inalámbrica de la historia.

Casi un siglo más tarde, en la década de los setenta, se originó un resurgimiento tanto en el campo experimental como teórico del fenómeno fotoacústico. Los trabajos de Kreuzer [\[6\]](#) y Rosencwaig [\[7,8\]](#) abrieron una puerta para la aplicación de esta técnica en numerosos campos de la ciencia, como son la biología, la medicina o la ingeniería.

2.2 Principios de la fotoacústica y técnicas de detección.

El principio subyacente de la fotoacústica es la calefacción periódica de una muestra, debido a la radiación lumínica incidente.

La absorción de parte del flujo energético concentrado en la superficie o repartido en el volumen de la muestra produce procesos de expansión y relajación en el material y especialmente en el gas colindante.

La conversión de la energía lumínica en calor, produce por tanto variaciones de temperatura y fluctuaciones de presión, a las cuales van asociadas características térmicas y acústicas que pueden ser medidas con los transductores apropiados.

El calentamiento de la muestra, no solo depende de la naturaleza del haz incidente, si no de sus propias propiedades ópticas. De esta forma tendremos en cuenta el coeficiente de absorción óptica del material, su eficiencia en la conversión de luz en calor y su difusividad térmica. Lógicamente, la señal fotoacústica detectada, será dependiente de estos factores, lo que nos permite obtener información sobre el comportamiento térmico del material a caracterizar.

La dependencia de la señal fotoacústica con el coeficiente de absorción óptica nos permite realizar el estudio espectroscópico, considerando el hecho que la señal también es proporcional a los procesos de conversión de luz en calor. De esta manera, la técnica fotoacústica puede usarse para conseguir información acerca de los procesos no térmicos.

Análogamente, el hecho de que la señal fotoacústica dependa de cómo el calor se difunde a través de la muestra, nos permite realizar su caracterización térmica, es decir las mediciones de las propiedades como la difusividad térmica o la conductividad térmica.

El montaje experimental típico para la medición fotoacústica, consiste en una cámara donde se coloca la muestra y se la expone a la incidencia de un haz lumínico. Así mismo, se somete el haz a un proceso de troceado (chopper), con el objetivo de radiar la muestra de forma periódica. A consecuencia de esta radiación periódica, la muestra es calefactada y aparecerá dentro de la cámara una onda de presión que oscila a la misma frecuencia que el haz de luz y que es medible con un micrófono adecuado tanto en amplitud como fase.

Se pueden diferenciar dos tipos de celdas fotoacústicas, en función de su implementación, las conocidas como cerradas y las abiertas.

2.2.1 Cámara fotoacústica abierta .

La muestra absorbe la radiación de la luz a diferentes frecuencias en la región ultravioleta visible e infrarroja, y con una frecuencia de la modulación constante.

Las muestras pueden ser óptimamente opacas o transparentes, y térmicamente delgadas o espesas. Variando la temperatura de la cámara fotoacústica la muestra sufre cambios en sus propiedades ópticas y térmicas que pueden descubrirse por el efecto fotoacústico.

Un micrófono anexo será el encargado de recoger la información acústica derivada del proceso y por la cual podremos obtener la caracterización de la muestra.

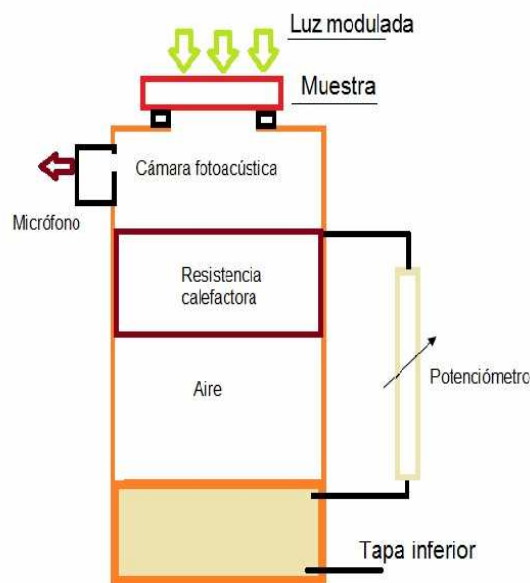


Figura 3: Modelo de celda fotoacústica abierta.

2.2.2 Cámara fotoacústica cerrada.

En este montaje, la muestra absorbe la radiación de la luz a frecuencias comprendidas entre 1Hz y 20 KHz. Esta radiación produce un flujo de calor modulado, el cual tiene asociado cambios de presión en el gas del interior de la cámara y procesos de expansión y relajación en la zona de incidencia del haz. La medición de estas ondas mecánicas permitirá determinar propiedades intrínsecas al material radiado.

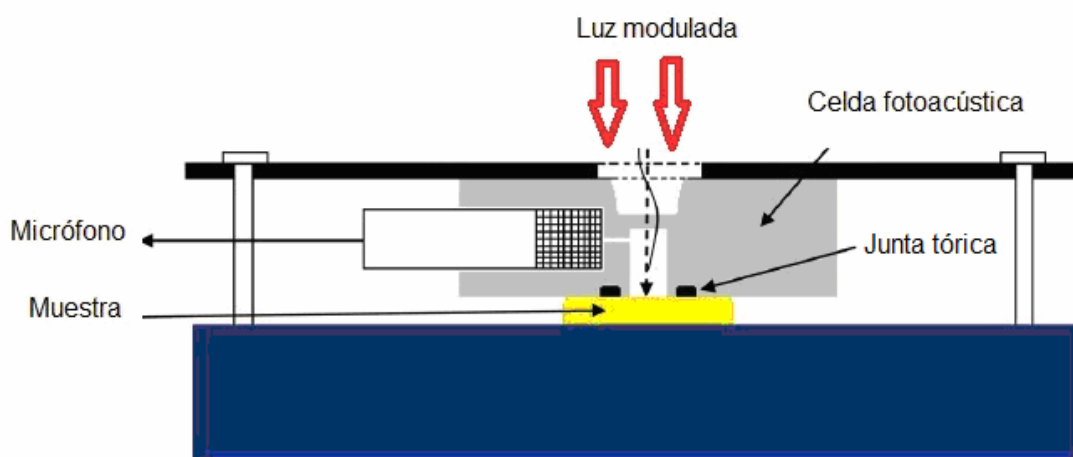


Figura 4: Modelo de celda fotoacústica cerrada

2.3 Modelo normal de generación fotoacústica.

El modelo que describe la señal fotoacústica en una muestra sólida, fue propuesto por Rosencwaig y Gersho (R-G) [9,10]. Estos autores, demostraron que el flujo de calor periódico entre la muestra y el gas de la cámara cerrada es el responsable de la señal acústica.

El esquema básico de la celda fotoacústica puede verse en la siguiente figura y es el fundamento teórico de las antes mencionadas celdas cerradas:

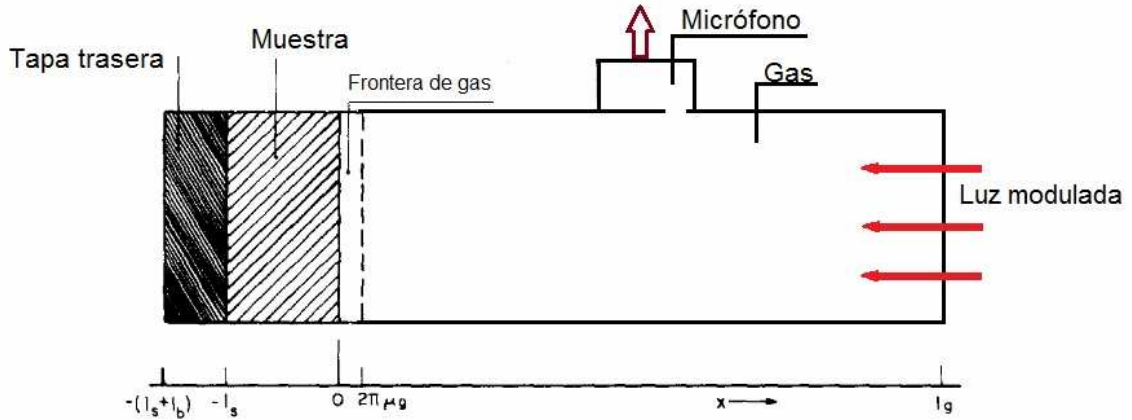


Figura 5: Modelo de celda fotoacústica de Rosencwaig

La celda consiste en una cámara donde se aloja la muestra a una distancia l_g del foco lumínico. El espacio comprendido entre el foco y la muestra está relleno de gas por el que se propagan las señales acústicas. Un micrófono situado en uno de los laterales del montaje es el encargado de recoger dichas señales.

Según R-G la variación de presión es solamente determinada por la distribución de temperatura en el sistema muestra – gas - tapa trasera. Asumiendo la modulación sinusoidal de la luz, su frecuencia será $\omega = 2\pi f$, con una intensidad:

$$I = 2I(1 + e^{j\omega t}) \quad (1)$$

El haz será incidente en la muestra, y denotando con β coeficiente de absorción óptico de la muestra y como η la eficacia de conversión de luz en calor, R-G resuelven la ecuación de difusión térmica del sistema como:

$$T_g = \theta e^{-\sigma_g x} e^{j\omega t} \quad (2)$$

donde:

$$\theta = \frac{\beta I_o}{2k_s(\beta^2 - \sigma_s^2)} \frac{(r-1)(b+1)e^{l_s\sigma_s} - (r+1)(b-1)e^{-l_s\sigma_s} + 2(b-r)e^{-\beta l_s}}{(g+1)(b+1)e^{l_s\sigma_s} - (g-1)(b-1)e^{-l_s\sigma_s}} \quad (3)$$

Siendo a su vez cada término de (3):

$$\sigma_i = (1+j)a_i \quad (4) \quad a_i = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \quad (5) \quad r = \frac{\beta}{\sigma_s} \quad (6)$$

$$b = \frac{k_b\sigma_b}{k_s\sigma_s} \quad (7) \quad g = \frac{k_g\sigma_g}{k_s\sigma_s} \quad (8)$$

El apéndice i denota cada uno de los elementos implicados en el sistema, K_i es la conductivita térmica, ρ_i la densidad, α_i la difusividad térmica y C_i el calor específico.

Así mismo, podemos expresar α_i como:

$$\alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i C_i} \quad (9)$$

R-G deduce de la ecuación (2), que la fluctuación del gas está comprendida entre la superficie de la muestra y una distancia $2\pi\mu_g$ de la misma, donde $\mu_g = a_g^{-1}$, siendo esta última la longitud de difusión térmica del gas. De esta forma sólo un pequeño diferencial de la columna de gas es capaz de responder a las fluctuaciones térmicas del sistema, formando así un pistón encargado de generar las señales acústicas que se expanden por el resto de la columna.

R-G describieron el comportamiento de este pistón como un sistema adiabático y cuyas fluctuaciones de presión pueden ser calculadas como:

$$\delta P = \frac{\gamma P_o \theta}{l_g \sigma_g T_o} e^{j\omega t} \quad (10)$$

Durante las últimas décadas la teoría fotoacústica ha sido exhaustivamente probada en todo tipo de muestras y en variedad de estados de la materia, como sólido, líquido y gas.

La dependencia de frecuencia de modulación de la señal fotoacústica fue verificada por diversos investigadores con distintos tipos de muestras como película delgada de polímero, solución de fenol líquido o sal roja de sodio. Estudios posteriores del modelo como los de Clelland y Kniseley [11] abordaron la investigación del efecto fotoacústico en muestras óptimamente opacas, en las cuales la longitud de difusión térmica es significativamente mayor que la profundidad de penetración óptica. A partir del estudio de soluciones de azul de metileno, pudieron corroborar el cumplimiento del modelo y la capacidad de determinación de la variable β de la muestra. Posteriormente Wetsel y McDonald [12] verificaron nuevamente estos estudios para diferentes materiales como el MnO_2 .

2.4 Modelos extendidos.

Siguiendo el modelo del pistón térmico de R-G descrito anteriormente, diversos investigadores han considerado efectos diferentes que mejoran la comprensión de la generación de la señal fotoacústica.

La teoría de RG está basada en dos hipótesis centrales, la cámara de gas de longitud l_g es mayor que la longitud de la difusión térmica en el gas, y mucho menor que la longitud de la onda acústica. Diferentes referencias [13,14,15] apuntan hacia una discrepancia, ya que éste es un aspecto débil del modelo de R-G dado que es incapaz de responder al efecto de apagado en la señal fotoacústica cuando la amplitud de la columna de gas es térmicamente delgada o cuando la l_g se acerca a un fragmento considerable de la longitud de onda acústica. En particular, McDonald y Wetsel han propuesto una descripción más adecuada de la señal fotoacústica, basada en la solución de ecuaciones termoelásticas apropiadas para la temperatura y la presión.

De esta forma de McDonald y Wetsel elaboran un nuevo modelo de pistón compuesto en el que se tiene en cuenta por un lado el pistón térmico descrito por R-G y por otro lado la vibración de la muestra, contribuyendo ambas causas a la generación de la señal acústica.

Sin embargo, este efecto de vibración de superficie es frecuentemente pequeño comparado al efecto del pistón térmico, excepto en el caso de absorción débil (transparencia) a las frecuencias altas de la modulación. Esto fue corroborado experimentalmente con multitud de muestras de diferentes naturalezas.

Otra refutación al modelo R-G, para condiciones experimentales con frecuencias de modulación muy bajas, ha sido la de Korpiun y Büchner [16].

Las publicaciones de ambos autores apuntan a varios fallos en el modelo, siendo uno de ellos el desprecio del volumen residual que genera el diafragma del micrófono y que es ocupado por gas. Este volumen debe ser tenido en cuentas para sistemas con un gas térmico delgado.

El segundo y fundamental punto de discrepancia citado por Korpiun y Büchner, es que la fluctuación de presión en la cámara de gas se describe como un proceso isocórico en lugar de la descripción isobárico adiabático propuesta por R-G .

2.4.1 Teoría fotoacústica para materiales multicapa.

Finalmente 1999 Xianfu Xu publico las bases de la teoría fotoacústica para materiales crecidos en multicapas [17]. Su artículo presentaba un solución general para esta nueva generación de muestras, basándose en la geometría de su estructura así como en sus propiedades térmicas y ópticas.

Xu presenta el siguiente esquema de sistema celda-muestra para la deducción de su modelo fotoacústico.

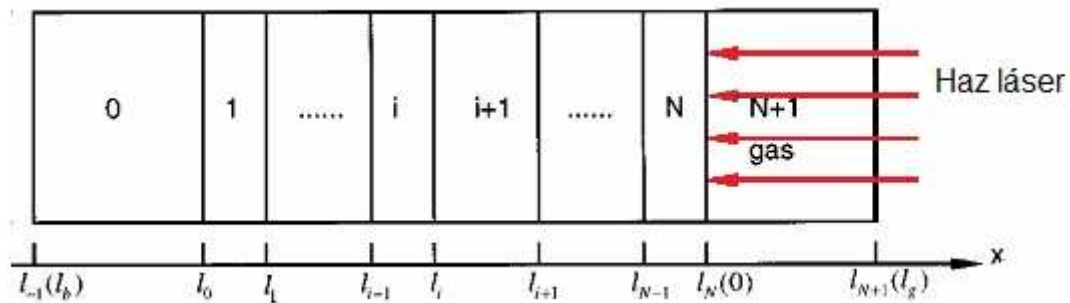


Figura 6: Modelo de celda fotoacústica de Xianfan Xu

El estudio fotoacústico de materiales en multicapas está basado en el uso de una celda cerrada e instrumentalizada de forma específica, utilizando un láser como fuente luminosa y un amplificador tipo lock-in para el tratamiento de la señal captada por el micrófono.

El estudio matemático realizado por Xu, se antoja bastante complejo, siendo por tanto citado en este estudio de forma general y presentando únicamente las ecuaciones resultantes, obviando la colección de términos y leyes físicas a que el autor recurre para su demostración.

La distribución de la temperatura a lo largo de cada capa i puede ser expresada como:

$$\theta_{N+1,s} = B_{N+1} e^{-\sigma_{N+1}x} e^{j\omega t} \quad (11)$$

Siendo el término B_{N+1} la solución a la ecuación matricial:

$$B_{N+1} = \frac{[0 \quad 1] \sum_{m=0}^N \left(\prod_{i=0}^{m-1} U_i \right) V_m \begin{bmatrix} E_m \\ E_{m+1} \end{bmatrix}}{[0 \quad 1] \left(\prod_{i=0}^N U_i \right) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (12)$$

La descripción genérica del pistón térmico será por tanto expresada como:

$$dp = \frac{p_{amb} B_{N+1}}{\sqrt{2} T_{amb} L_g a_g} e^{j(\omega t - \pi/4)} \quad (13)$$

Donde de acuerdo con Xu, el cambio de fase de la señal fotoacústica puede ser calculada como $\text{Arg}(B_{N+1}) - \pi/4$.

3. Desarrollo

3.1 Modelo matemático del efecto fotoacústico.

El modelo matemático utilizado para el sistema es el derivado de los trabajos de Xu y su teoría fotoacústica en materiales multicapas.

Partiendo de la ecuación general que Xu plantea para la distribución de la temperatura en la muestra con N+1 capas, tenemos que:

$$\theta_{N+1,s} = (1 - \rho) B_{N+1} e^{-\sigma_{N+1}x} e^{j\omega t} \quad (14)$$

Donde el término B_{N+1} puede ser expresado como:

$$B_{N+1} = \frac{[0 \quad 1] \sum_{m=0}^N \left(\prod_{i=0}^{m-1} U_i \right) V_m \begin{bmatrix} E_m \\ E_{m+1} \end{bmatrix}}{[0 \quad 1] \left(\prod_{i=0}^N U_i \right) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (15)$$

Y a su vez los términos U_i y V_m corresponden respectivamente a las siguientes matrices:

$$U_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u_{11,i} & u_{12,i} \\ u_{21,i} & u_{22,i} \end{pmatrix} \quad (16) \quad V_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} v_{11,i} & v_{12,i} \\ v_{21,i} & v_{22,i} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Análogamente, tanto u_i como v_i se expresan como:

$$u_{1n,i} = (1 \pm k_{i+1} \sigma_{i+1} / k_i \sigma_i \mp k_i \sigma_i \times \sigma_{i+1} R_{i,i+1}) e^{(\pm \sigma_{i+1} l_{i+1})} \quad (18)$$

$$u_{2n,i} = (1 \pm k_{i+1} \sigma_{i+1} / k_i \sigma_i \mp k_i \sigma_i \times \sigma_{i+1} R_{i,i+1}) e^{(\pm \sigma_{i+1} l_{i+1})} \quad (19)$$

$$v_{n1,i} = 1 \pm \beta_i / \sigma_i \quad (20)$$

$$v_{n2,i} = (-1 \pm k_{i+1} \beta_{i+1} / k_i \sigma_i + k_{i+1} \times \beta_{i+1} R_{i,i+1}) \times e^{(-\beta_{i+1} l_{i+1})} \quad (21)$$

Así mismo, el término E_m se corresponde con la siguiente igualdad:

$$E_m = \frac{G_m}{\beta_m^2 - \sigma_m^2} \quad (22)$$

Donde el término G_m se deduce del siguiente sistema de ecuaciones en función del número de capas:

$$G_m = \begin{cases} \frac{\beta_m I_0}{2k_m} e^{-\sum_{i=m+1}^N \beta_i l_i} & \text{for } m < N \\ \frac{\beta_m I_0}{2k_m} & \text{for } m = N \\ 0 & \text{for } m = N + 1 \end{cases} \quad (23)$$

Una vez simplificado el sistema de ecuaciones en función del número de capas de la muestra y de las propiedades de las mismas, podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\Phi = \Phi' + \text{Arg}(B_{N+1}) - \pi / 4 \quad (24)$$

Donde Φ es la fase en grados de la señal fotoacústica y Φ' la fase de referencia generada por el oscilador de control del láser.

3.2 Diseño de la celda fotoacústica.

El diseño de la celda fotoacústica, ha sido enfocado para el estudio de tres tipos de muestras con las que se va a trabajar.

- Nano hilos termoeléctricos crecidos sobre base de Au.
- Láminas delgadas multicapa sobre sustrato de Si.
- Muestras en volumen.

Acorde con los estudios de Xianfan Xu [\[17\]](#) y R-G [\[10\]](#), un diseño inadecuado de las dimensiones de la cámara interior, provocaría resonancias internas, impidiendo por tanto el buen funcionamiento de la misma. Para ello se ha de tomar como parámetro de diseño, que la longitud máxima de la cámara ha de ser la mitad que la longitud de onda del sonido en el gas interior.

Expresado analíticamente tenemos que $L_g < \lambda_s/2$. De acuerdo con esto y teniendo en cuenta que la longitud de onda sonora en el medio es inversamente proporcional a la frecuencia de la misma, se planteo el siguiente sistema de ecuaciones para el cálculo de la longitud máxima de la cámara.

Así tendremos que:

$$\lambda_s = \frac{v}{f} \quad (25)$$

Siendo v , la velocidad del sonido en el medio y que responde a la expresión:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \quad (26)$$

Donde C es el módulo de volumen es y ρ la densidad.

Análogamente se ha de calcular la máxima distancia de fluctuación de la temperatura en el gas, tomando como origen la superficie de la muestra, tal y como indica el modelo R-G (figura 3).

La fluctuación de la temperatura se presentará en un diferencial de la columna de gas, tendiendo a cero rápidamente una vez se vea rebasada esta distancia. Tanto R-G como Xu, expresan esta distancia como:

$2\pi\mu g$, siendo $\mu g = a_g^{-1}$.

Así mismo a_g^{-1} se corresponde con la expresión:

$$ag^{-1} = \frac{\omega}{2\alpha i} \quad (27)$$

Donde α es la difusividad térmica del medio y se expresa como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C} \quad (28)$$

Operando en ambas expresiones y tomando $\omega = 2\pi f$ llegamos a la expresión:

$$\mu g = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho C}} \quad (29)$$

Con el objeto de optimizar el rendimiento del dispositivo, se plantearon los siguientes gases para ocupar el interior de la celda fotoacústica:

- Argón (Ar)
- Aire
- Helio (He)
- Nitrógeno (N)

Se ha realizado un estudio comparativo de los gases, examinando la influencia de la frecuencia sobre los parámetros del diseño de la celda. Se han tomado como datos los valores de densidad (ρ), conductividad térmica (k), velocidad del sonido (v) y módulo de volumen ©. Todos ellos han sido obtenidos de tablas tabuladas publicadas en la literatura. El estudio comparativo de la longitud máxima que permite cada gas, se puede ver en la siguiente representación, quedando el resto de tablas y gráficas del análisis a disposición del lector en el anexo A.

3.2.1 Comparativa de longitud de onda acústica $\lambda_s / 2$ en todos los gases:

En la tabla adjunta, se relacionan los resultado de la longitud máxima de onda para las diferentes frecuencias de modulación de la señal luminosa.

Frecuencia	Aire	Nitrógeno	Helio	Argón
100	171,5	166,8	485	1,60E+02
200	85,75	83,4	242,5	7,98E+01
500	34,3	33,36	97	3,19E+01
1000	17,15	16,68	48,5	1,60E+01
10000	1,715	1,668	4,85	1,60E+00
15000	1,14333	1,112	3,23333	1,06E+00
20000	0,8575	0,834	2,425	0,7975

Figura 7: tabla comparativa de gases propuestos

Una vez terminado el estudio matemático, procedemos a la representación de los datos para una mejor interpretación de los mismos, siendo el resultado el que se muestra a continuación:

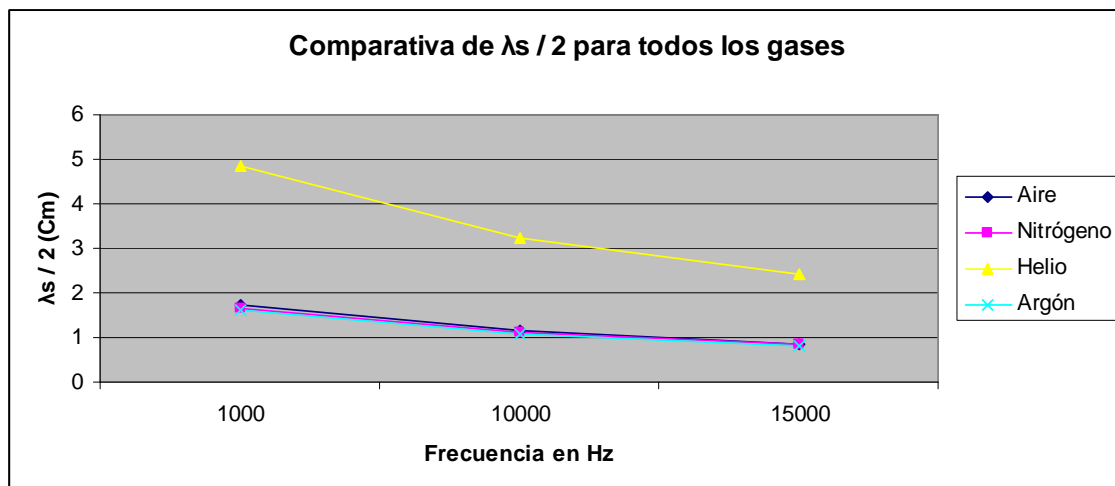


Figura 8: Gráfica comparativa entre gases

Como se puede observar en el gráfico anterior, el uso de Helio como gas de transmisión para la onda acústica presenta una clara ventaja respecto al resto de gases estudiados. Las propiedades del Helio, permiten una longitud máxima de la cámara de hasta 2.42 cm, frente a los aproximadamente 0.8 cm que permiten el resto de gases.

Tras varias deliberaciones, se apostó por un diseño capaz de trabajar de forma adecuada con aire, ya que esto nos blinda a posibles problemas derivados de fugas.

Por ello se fijó la longitud del cilindro interior en 7 mm con un diámetro de 3 mm, siendo este último más que suficiente para las muestras a tratar.

Una vez conocidas las medidas internas de la cámara, se realizó un diseño de la misma adecuándola a la instrumentación con la que se utilizaría posteriormente. De esta forma se dotó al diseño de los correspondientes orificios para alojar el micrófono y la fibra del láser utilizando para la instalación de esta última un acople específico del fabricante THORLAB (ANEXO F). El material escogido para la fabricación fue el teflón, ya que se trata de un material adecuado por sus características ópticas y su baja conductividad térmica, de tan sólo 0.21 Kcal/mh° C.

Tanto los planos de fabricación como las medidas pueden ser consultadas en el ANEXO B.

3.2.3 Imágenes del dispositivo físico final.

En las siguientes imágenes se puede ver el resultado final de la celda terminada y con la instalación del micrófono y el acople para el láser instalado.

La siguiente ilustración, muestra la celda vista desde su parte superior, una vez fueron instalados tanto el acople para la fibra óptica como el micrófono con su correspondiente cableado.

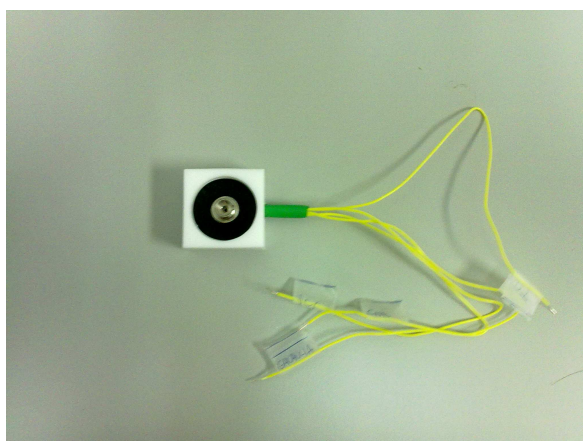


Figura 9: Vista superior de la celda

En esta imagen observamos la parte inferior de la celda, donde se puede apreciar el alojamiento del micrófono (en este caso sellado), así como el taladro utilizado como cámara de expansión del gas.

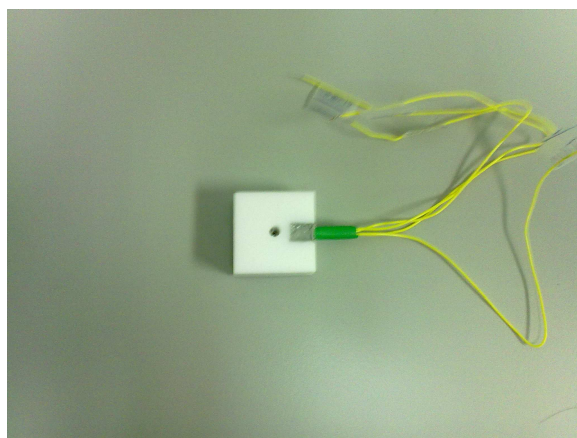


Figura 10: Vista inferior de la celda

3.3 Instrumentación.

El sistema de instrumentación será el encargado de recoger y almacenar la señal fotoacústica. Está compuesto de varios elementos debidamente interconectados, y su esquema general se puede ver en la siguiente figura.

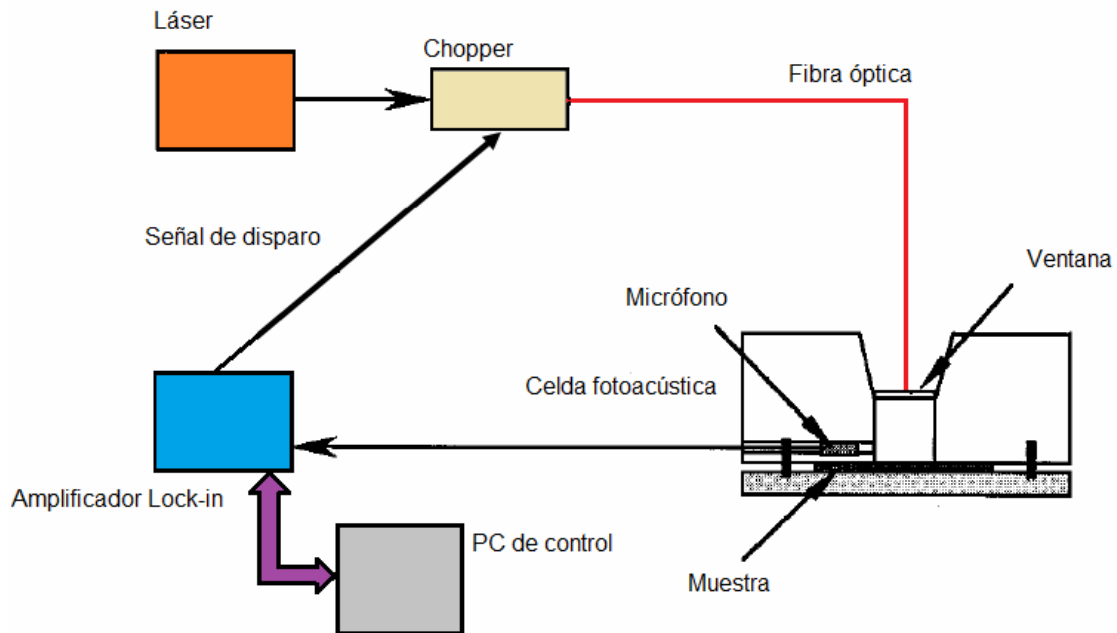


Figura 11: Esquema del sistema de instrumentación.

Relación de componentes:

Micrófono: Es el transductor encargado de recoger las señales acústicas dentro de la celda. El modelo elegido es el Knowles Acoustic SPM0408HE5H de tecnología MEMS. Los criterios para la elección de este componente son su reducido tamaño en relación a los micrófonos convencionales, siendo este de apenas 3mm^2 y su elevada sensibilidad (-22) db regulable electrónicamente.



Figura 12: Micrófono MENS SPM0408HE5H

Amplificador Lock-in: El Lock-in tiene como objetivo principal la amplificación y aislamiento de la señal fotoacústica respecto al resto de señales (ruido). Para el diseño se ha utilizado el Signal Recovery 7072. Dadas las características de este dispositivo, se ha podido suprimir el generador de frecuencias auxiliar necesario para la regulación del chopper, dado que el aparato incorpora salidas analógicas apropiados para esta tarea. Así mismo el amplificador consta de conexiones digitales para control mediante protocolo USB, permitiendo así su gestión desde un ordenador.



Figura 13: Amplificador Lock-in SR 7270

Ordenador: Se trata de un ordenador personal (PC) de propósito general. Para la gestión del experimento, se han añadido tanto los driver's de control para el amplificador como el entorno gráfico Lab-View 2009, desde el cual se puede gestionar el proceso experimental y la recogida de datos.

Láser: Se ha utilizado un láser fibrado Alphaslabs LD-10 con una longitud de onda de 950 nm, por lo que su emisión es el espectro infrarrojo. Se a escogido una longitud de onda infrarroja, dado que su comportamiento es más eficiente a la hora de calentar un material.

Chopper: El chopper o troceador es un dispositivo encargado de la modulación de la luz del láser. La frecuencia de la modulación es gestionada por una señal externa procedente en este caso del amplificador lock-in. En el sistema implementado, el chopper se encuentra integrado dentro del láser Alphaslabs LD-10.



Figura 14: Láser Alphalabs LD-10

3.3.1 Protocolo de funcionamiento:

El sistema de instrumentación responde de forma conjunta al control del usuario desde el ordenador, salvo para la regulación del láser que debe hacer de forma manual desde el propio dispositivo.

Para la realización de un experimento se procederá a la especificación de los parámetros relativos a la exposición lumínica, es decir se calibrará el barrido en frecuencia que deberá realizar el chopper para modular el haz lumínico.

Se generará por tanto una rampa de frecuencias en la que se deberá definir por un lado la frecuencia de arranque y de parada en Hz, así como el incremento en cada escalón de la rampa y el tiempo de espera entre ellos. La amplitud de la señal permanecerá fija a 5v tal y aconseja la tarjeta de control del chopper.

Una vez estos parámetros han sido definidos por el usuario, el sistema podrá ponerse en marcha. Dado que el amplificador es el encargado de generar la señal de modulación, se utilizará esta misma como referencia interna del lock-in. De esta forma el amplificador aislará sólo la señal del micrófono que tenga la misma frecuencia de la referencia, pudiendo de esta forma medir la diferencia de fase entre las mismas.

Este dato medido en tiempo real será volcado a un fichero de texto donde se almacenará para su posterior procesamiento matemático.

3.3.2 Diseño de hardware para conexión de dispositivos.

Para hacer posible la conexión del micrófono con el sistema de adquisición de datos, es necesaria la implementación de un circuito capaz de unir ambos sistemas.

Así mismo aprovechando que el SPM0408HE5H es un transductor activo, integraremos un sistema de control de ganancia y una etapa de filtrado para eliminar frecuencias no deseadas.

Para el desarrollo del mismo, partiremos del esquema genérico aportado por el Knowles en el catálogo del SPM0408HE5H.

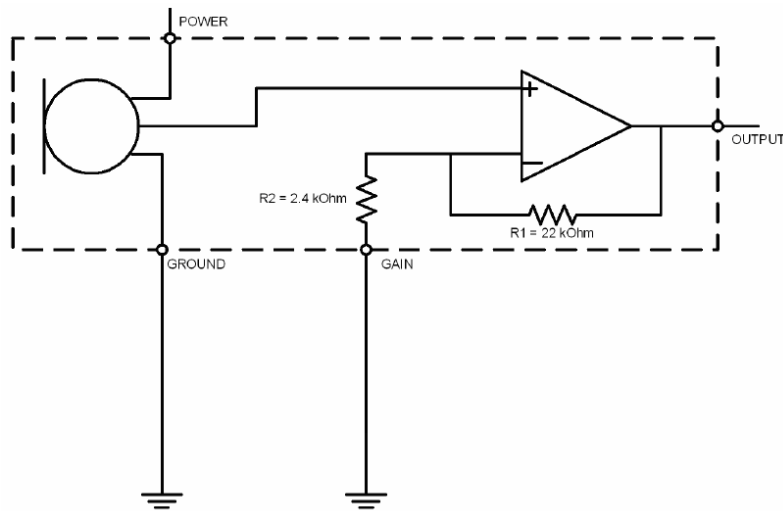


Figura15 : Esquema eléctrico del micrófono

Modelando la señal del micrófono como una onda alterna V_i , se puede representar el circuito equivalente, provisto del control de ganancia ($R3$) y de un filtro un filtro paso banda.

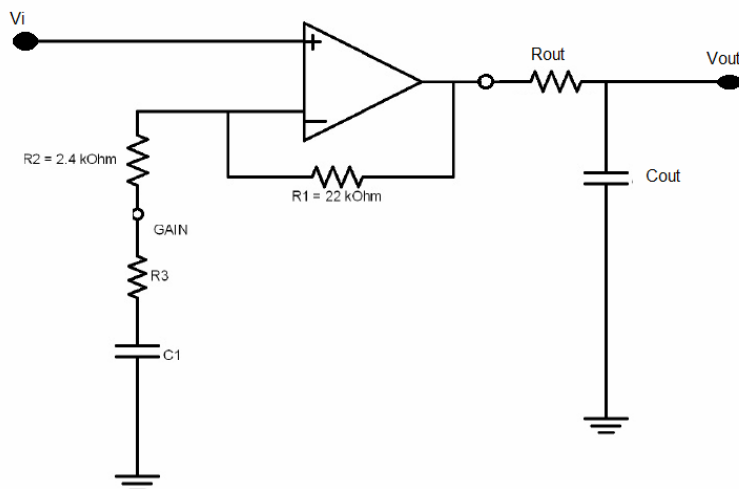


Figura 16: Esquema eléctrico del micrófono y la etapa de filtrado

A continuación se desarrollan los cálculos oportunos para la elección de componentes.

Para ello se realiza un análisis matemático del sistema equivalente.

3.3.2.1 Cálculo de R_3 para control de ganancia.

El sistema equivalente corresponde con un amplificador operacional en configuración no inversora, podemos expresar la tensión de salida como:

$$V_o = \left[1 + \frac{R_1}{(R_2 + R_3)} \right] V_i \quad (30)$$

Siendo por tanto su ganancia en db:

$$G(\text{db}) = 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \quad (31)$$

Teniendo en cuenta que tanto R_1 como R_2 son componentes internos del transductor, cuyo valor indica el fabricante, podemos despejar el valor de R_3 que fija la ganancia deseada.

Por tanto imponiendo una ganancia de 15db, el valor resultante de R_3 será $4,7K\Omega$, este valor se implementará con un potenciómetro multi-vuelta a fin de poder ajustar la ganancia de forma sencilla.

3.3.2.2 Cálculo de la etapa de filtrado.

3.3.2.2.1 Filtro de entrada paso alto.

Realizando el pertinente análisis de los polos del sistema, podemos expresar la frecuencia de corte del filtro de entrada como:

$$F_c = \frac{1}{2\pi(R_2 + R_3) \times C_1} \quad (32)$$

Tomaremos un valor de $C_1 = 4,7\mu F$, situando así la frecuencia de corte inferior en 10Hz.

3.3.2.2 Filtro de salida paso bajo.

Análogamente al filtro anterior, podemos calcular la frecuencia de corte del filtro de salida mediante el análisis de los polos del sistema formado por R_{out} y C_{out} .

$$F_c = \frac{1}{2\pi \times R_{out} \times C_{out}} \quad (33)$$

Tomando R_{out} , como $2\text{k}\Omega$, podemos despejar el valor de C_{out} que nos sitúa la frecuencia de corte en 10kHz . El valor resultante para C_{out} es de 4nF

FILTRO PASO ALTO		
<i>Componente</i>	<i>Valor</i>	<i>fc</i>
R3	4,7 k Ω	10 Hz
C1	4,7 μF	

FILTRO PASO BAJO		
<i>Componente</i>	<i>Valor</i>	<i>fc</i>
R_{out}	2 k Ω	20Kz
C_{out}	4 nF	

3.3.3 Análisis informático del comportamiento del sistema.

Podemos representar la respuesta en frecuencia del sistema completo, mediante la simulación informática en el software analítico OrCad Pspice. Se ha modelado la señal del micrófono como una fuente alterna de 10uV de tensión de salida. La resistencia para el control de ganancia, se ha modelado como un potenciómetro para poder así realizar un ajuste sencillo de la misma en la etapa de calibración.

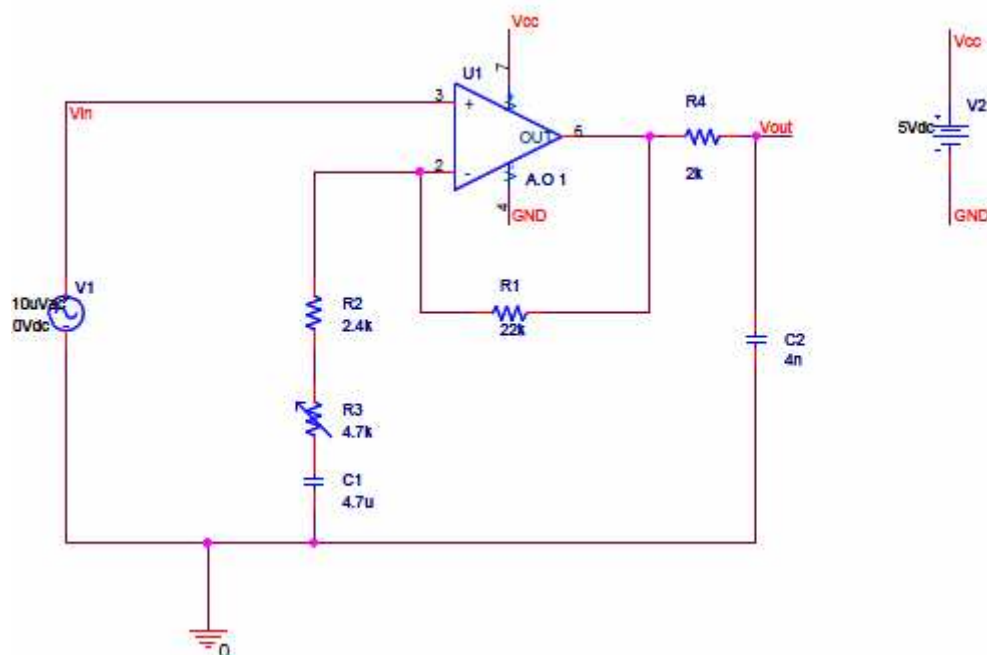


Figura 17: Esquemático OrCad del circuito completo

La simulación en frecuencia nos permite observar una respuesta en frecuencia prácticamente lineal a frecuencias medias. Se he representado por una parte tensión de salida Vout en V (rojo) y la ganancia en db (azul).

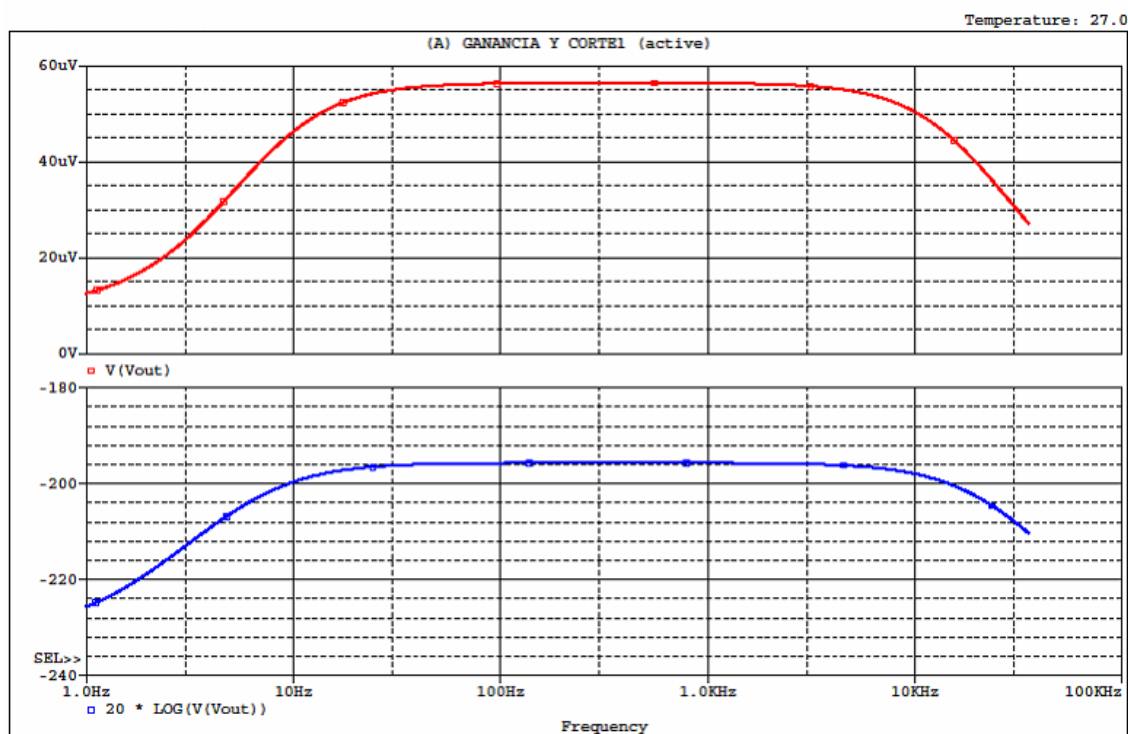


Figura 18: Diagramas de Bode de ganancia y frecuencia de paso

3.3.4 Diseño del circuito impreso PCB.

La implementación final del circuito se realizará en un PCB, cuyo fotolito se muestra a continuación:

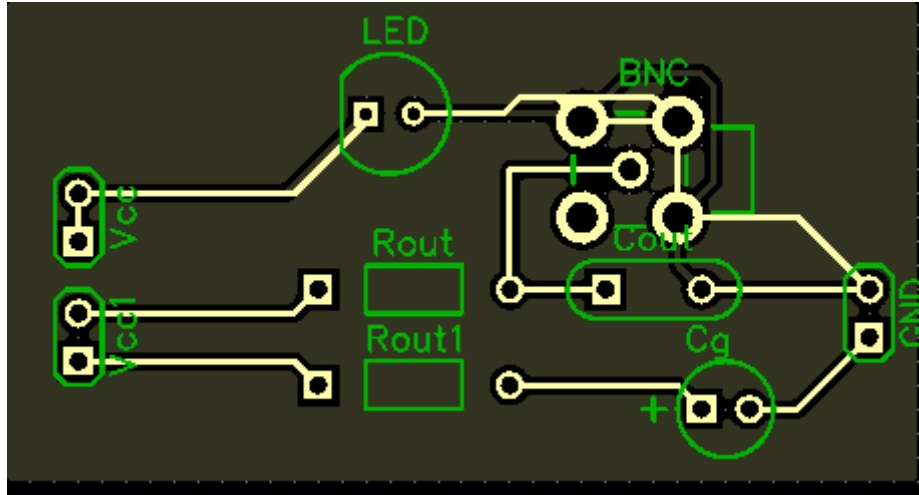


Figura 19: Capa TOP del PCB

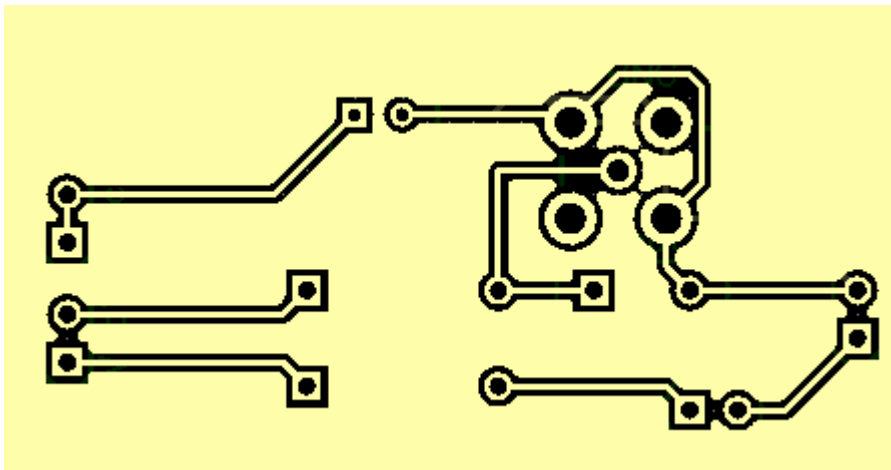


Figura 20: Capa bottom del PCB

Imagen del circuito final implementado:

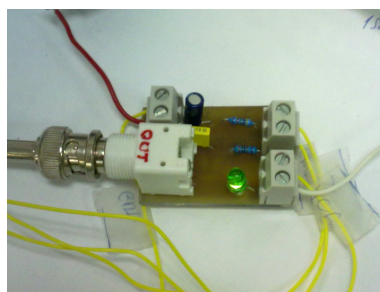


Figura 21: imagen del circuito implementado

3.4 Representación del cableado del sistema completo.

El esquema de cableado del sistema completo es el mostrado en la siguiente ilustración.

Todos los elementos salvo el micrófono son alimentados directamente desde la tensión de la red (230Vac).

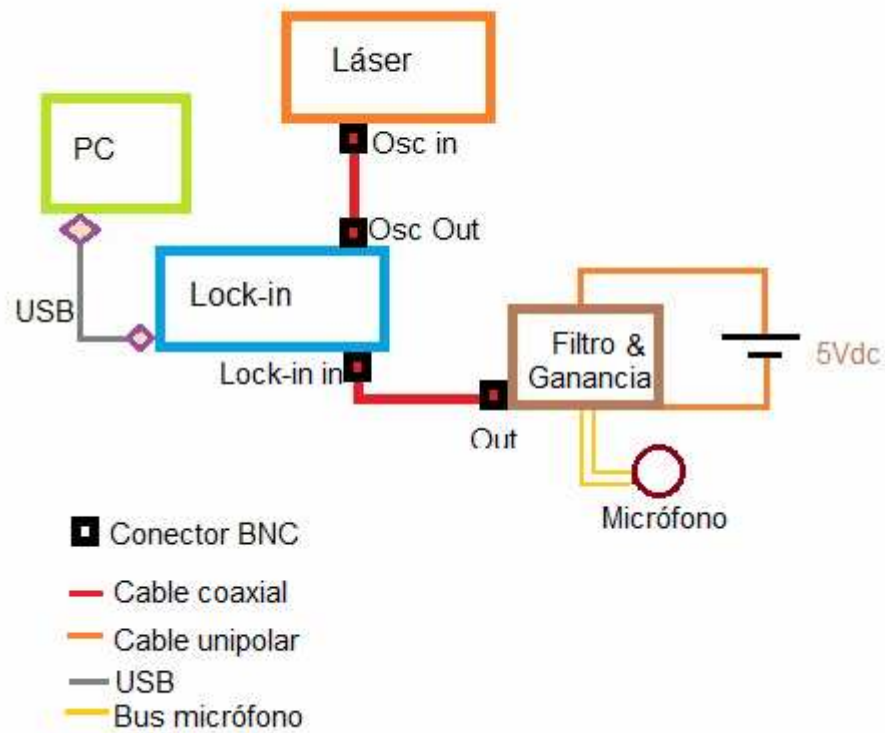


Figura 22: Esquema de cableado del sistema completo.

Imagen del montaje físico en el laboratorio:

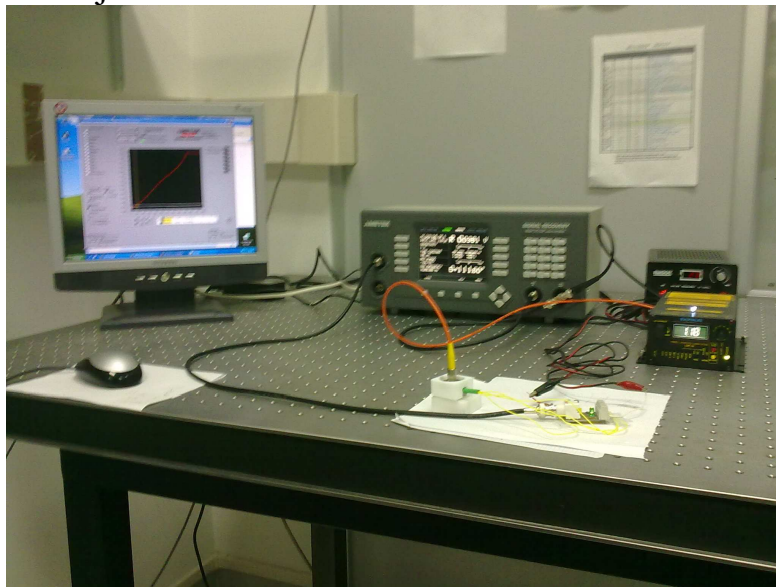


Figura 23: Imagen del montaje realizado en el laboratorio.

3.5 Desarrollo de programa de instrumentación virtual.

La gestión del experimento, se ha implementado en un sistema de instrumentación virtual, desde el cual se pueden gobernar todos los parámetros de control ajustables y la recopilación de datos.

Para este propósito se ha utilizado el entorno de programación gráfico LabView 2009.

Se ha tomado como base el amplio paquete de pantallas que Signal Recovery ofrece junto con su amplificador lock-in SR 7270. Gracias a este paquete se puede gobernar de forma completamente remota el equipo mediante el pc de control, lo que simplifica de forma notable el trabajo en el laboratorio.

En este capítulo se explicará la interface utilizada, las modificaciones realizadas al software original para adecuarlo al propósito del sistema fotoacústico pueden ser consultadas en el apéndice.

3.5.1 Panel de control.

El panel de control es la ventana principal de comunicación con el amplificador lock-in.

Desde este podremos una vez conectados realizar el auto calibrado del sistema mediante las funciones “Auto Sensitivity” y “Auto Phase”.

La primera de las funciones nos permite calibrar el rango de medida en mV, quedando esta de la forma más adecuada para la amplitud de la señal de entrada, así mismo permite al aparato enclavarse en la frecuencia de referencia.. La amplitud de la señal será proporcional a la potencia fijada en el láser de forma manual.

Análogamente la función “Auto Phase” es de gran utilizada en nuestro sistema, ya que permite crear una referencia de fases virtual. De esta forma, la medida de fase en ° ofrecida por el amplificador es en valor absoluto entre la señal de referencia y la señal captada por el micrófono.

Los botones Osc Sweep y Curve Buffer, nos permiten acceder a los menús de gestión del oscilador (encargado del chopper del láser) y a la pantalla de adquisición de datos respectivamente, por lo que serán de vital importancia en la gestión y puesta en marcha del sistema de medida.

El resto de funciones ofrecidas por el panel de control, se encuentran en “make to default”, opción que nos permite dejar un valor fijo en las mismas

dado que una vez configuradas no necesitan ser modificadas para las sucesivas medias.

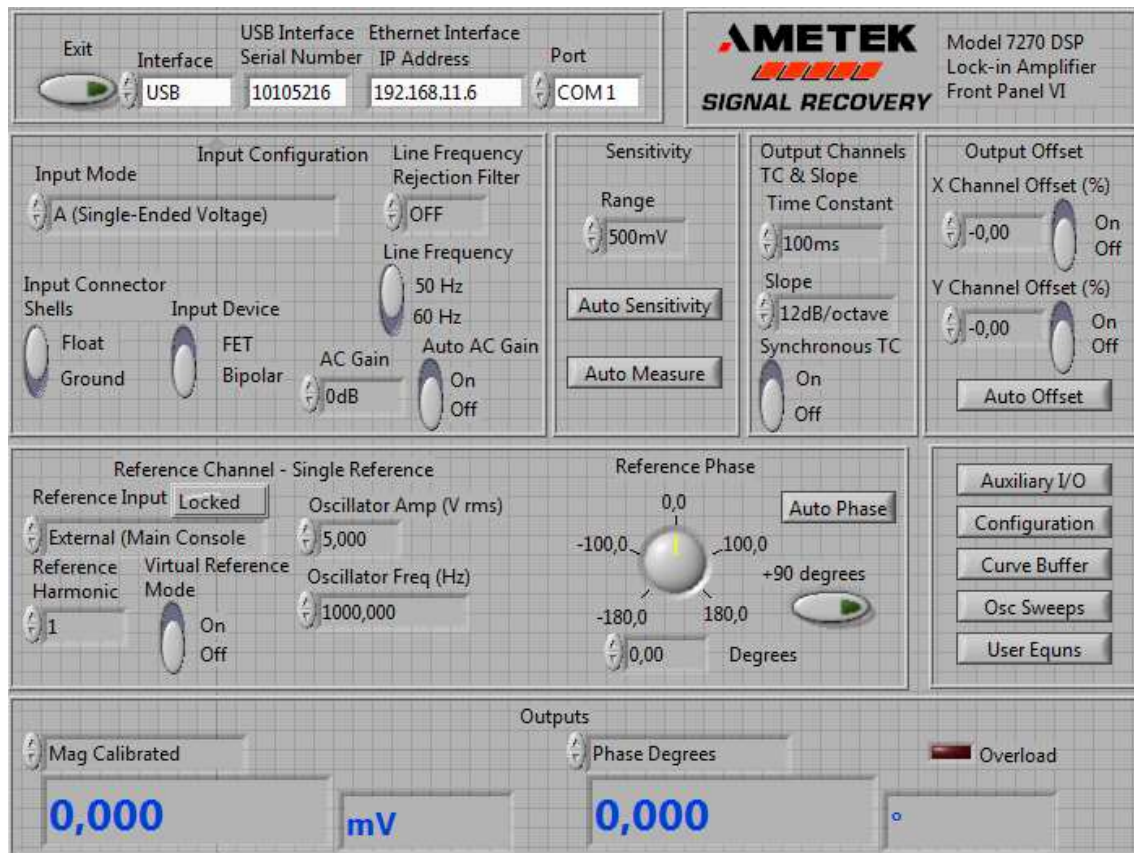


Figura 24: Panel de control Lock.in en LabView.

3.5.2 Osc Sweeps

En este montaje el oscilador será el encargado de gestionar el troceado del láser y de generar la señal de guiado del lock-in.

El oscilador del SR 7270 puede ser configurado tanto en amplitud como en frecuencia.

Así mismo permite programar barridos en amplitud y frecuencia. En el caso que se explica, la amplitud no es un parámetro de influencia y estará fijado a $5V_{rms}$ como indica el fabricante del chopper asociado al láser.

Por tanto, una vez calibrado el sistema desde el panel de control, pulsaremos en “Osc Sweeps”, desde donde configuraremos los siguientes parámetros:

- **Start Frequency** : fija la frecuencia inicial en Hz.
- **End Frequency**: fija la frecuencia final en Hz.

- **Frequency step:** configura el aumento de frecuencia en Hz en cada escalón.
- **Time per step :** configura el tiempo entre escalones.
- **Linear / Log :** refiere las medidas a una escala lineal o logarítmica.

Una vez configurados todos los parámetros el sistema será capaz de generar una rampa de frecuencia con la que gestionar el chopper.

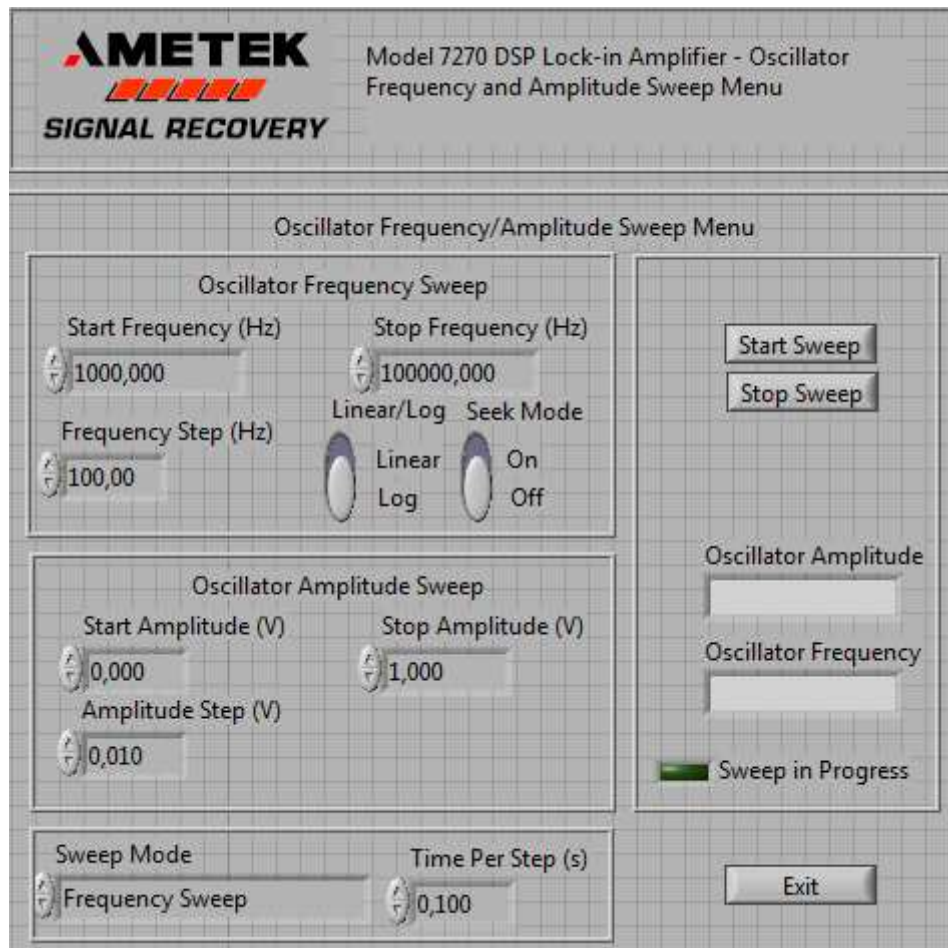


Figura25: Control del oscilador en LabView.

3.5.3 Curve Buffer.

El curve buffer es un sistema de captura y representación de datos de salida. Desde este programa podremos seleccionar las variables de interés y calibrar el número de datos y tiempo entre los mismos deseado. Las variables a configurar serán las siguientes:

- **Curve length:** fija el número de datos recopilados.
- **Time per point:** configura el escalón entre captura de datos.

Una vez terminada la captura de datos, el sistema será capaz tanto de representar la curva resultante, como de generar un fichero de texto donde se ordenan los valores numéricos de la variable deseada (Phase para este estudio).

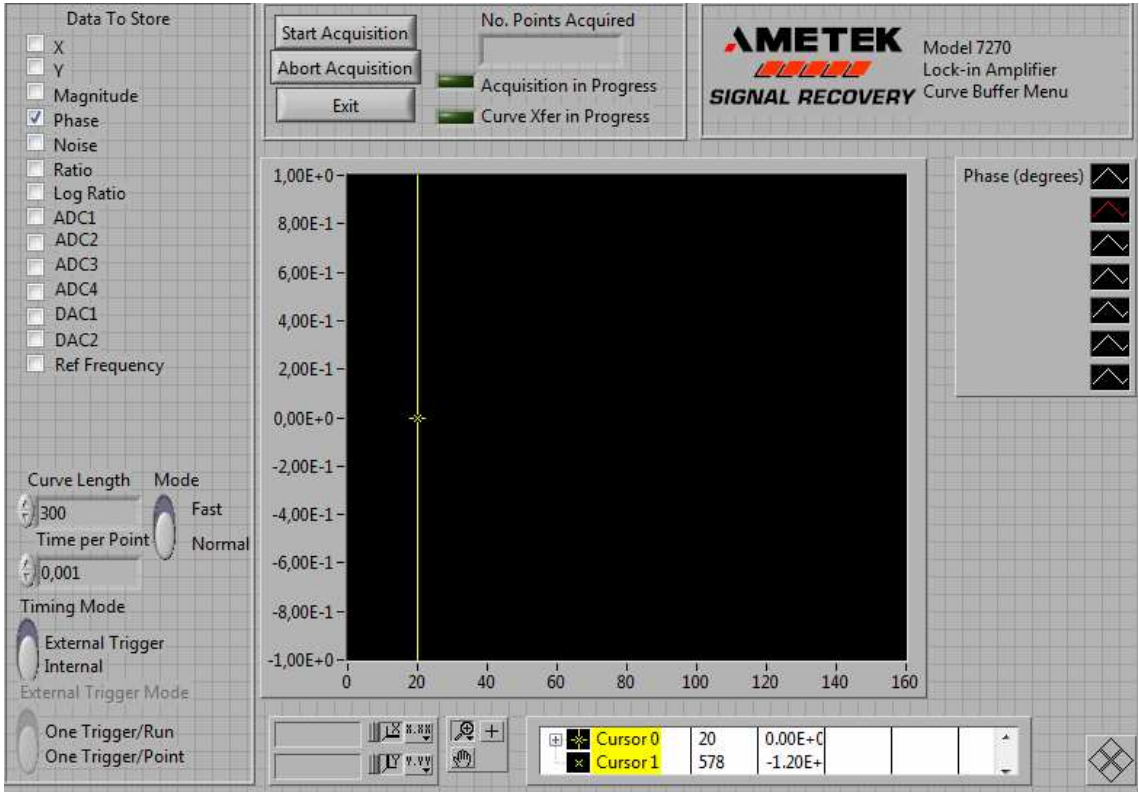


Figura 26: Curve buffer en LabView.

3.6 Desarrollo de programa de análisis matemático.

Tras un primer análisis manual de las ecuaciones que conciernen el modelo utilizado, se observó que su desarrollo algebraico es de un nivel de complejidad muy alto. Debido a esto, se decidió utilizar una herramienta informática que permitiese por un lado desarrollar algebraicamente la ecuación específica para cada muestra a partir del modelo general y en ultima instancia, resolver esta de forma numérica.

El software utilizado para la aplicación es el entorno matemático MATHEMATICA 7.0.

Seguidamente, se muestra un diagrama de bloques que representa las funciones que debe llevar a cabo el programa.

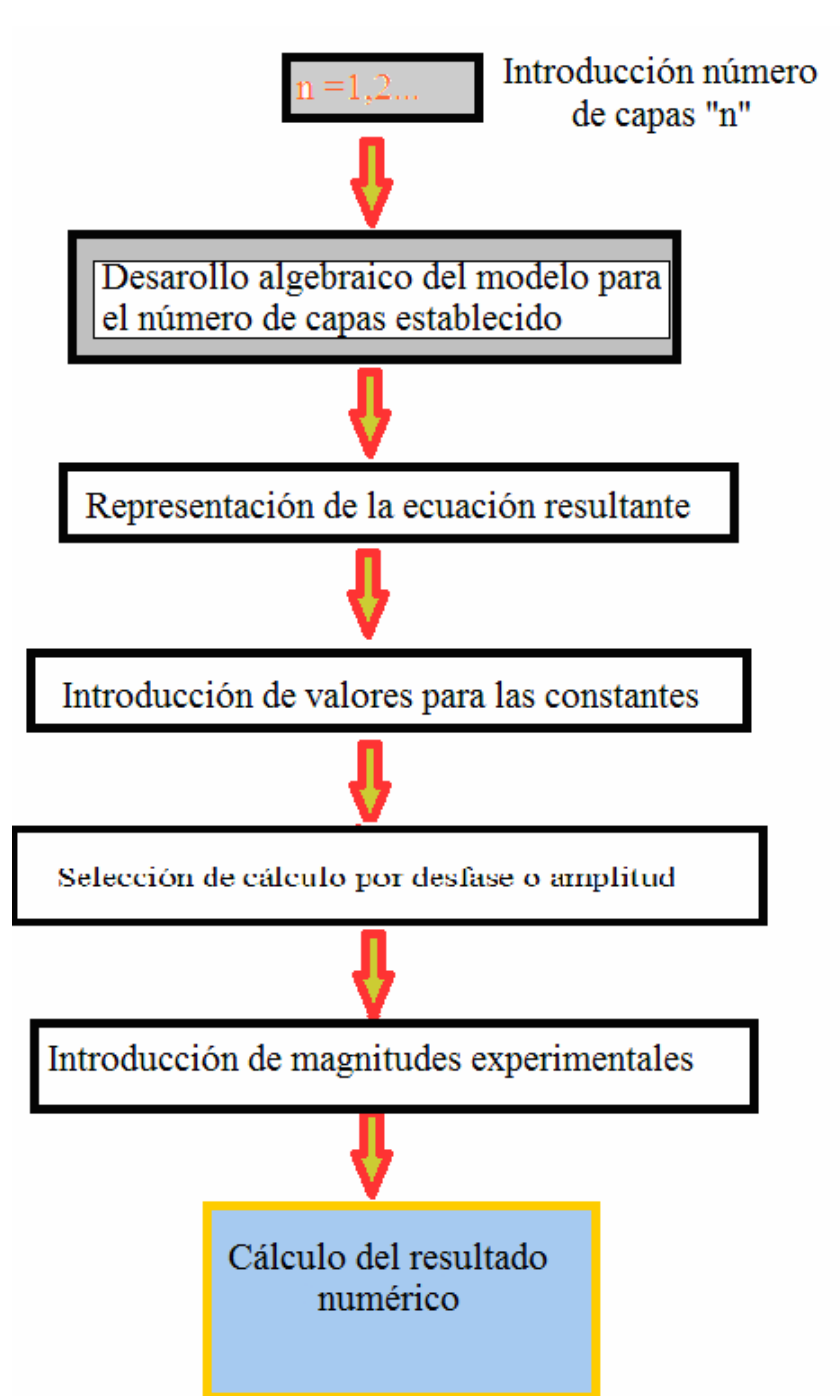


Figura 27: Esquema general del programa matemático.

De esta forma y tras la conclusión de la programación, se obtuvo una aplicación de uso sencillo, desde la cual el investigador sólo tiene que introducir los datos relativos a las constantes de las muestras para obtener un valor numérico de la conductividad k de las mismas.

El desarrollo del programa completo puede ser consultado en el ANEXO C, donde se incluyen tanto la programación como los resultados algebraicos generados por el entorno matemático.

3.7 Calibración del sistema.

Para la calibración del sistema se han seleccionado un conjunto de muestras que barren un amplio rango de valores de conductividad térmica.

El rango de valores oscila entre los 0.03 (W/mK) y los 237 (W/mK). La descripción de cada material se puede ver en la tabla adjunta.

Material	K (W/mK)
IRMM-440	0.03
Kevlar	0.04
Teflón	0.25
Pirex 7740	1.14
Macor	1.46
Piroceram	4.66
Aisi 304	16.27
Alumnio	237

Así mismo para verificar el comportamiento de los componentes, se realizó el montaje de un sistema de pruebas, en el que se sustituyó el láser por un altavoz conectado a un generador de frecuencias. De esta forma se pudo hacer un estudio del comportamiento del micrófono y el amplificador lock-in, con la ayuda de un osciloscopio multicanal donde representar las señales obtenidas.

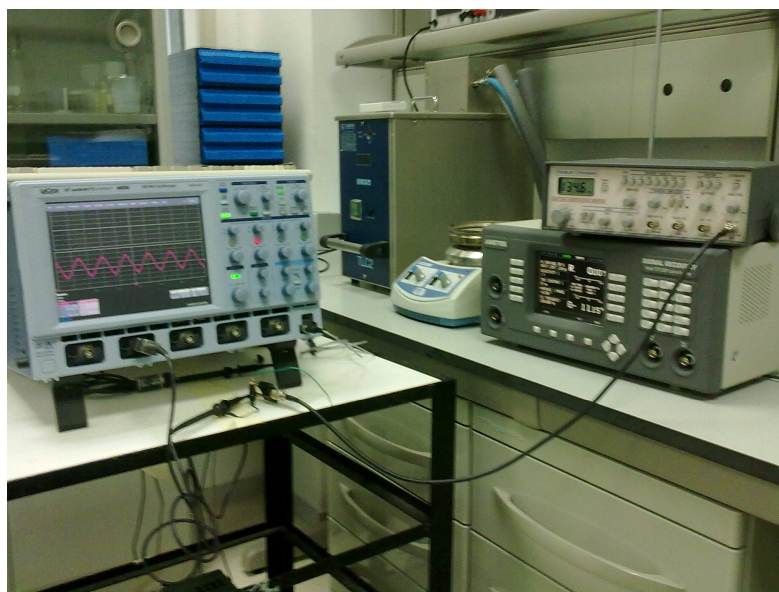


Figura 28: Montaje experimental para verificación del sistema.

Tras el análisis de los resultados obtenidos tanto de forma virtual (LabView), como con la ayuda de las funciones del osciloscopio, se pudo comprobar que funcionamiento correcto del sistema, el cual era capaz de medir el desfase entre la señal de referencia y la onda acústica de forma exacta.

Para la simulación del desfase se utilizaron las opciones del generador de frecuencias.

Análogamente y teniendo en cuenta que la medida del desfase está muy poco afectada por efectos parásitos como el ruido o el offset, no fue necesaria la corrección de ninguna variable. Es por ello que se prefirió el uso del desfase frente a la medida de amplitud, magnitud mucho más difícil de aislar y cuantificar de forma precisa.

4. Resultados experimentales

4.1 Resultados experimentales del lock-in

Una vez concluida la etapa de diseño e implementación del sistema, se procedió a su puesta en marcha, utilizando para las primeras medidas experimentales, materiales de referencia de sobra caracterizados en la literatura.

Tras el análisis de los datos se pudo comprobar el buen funcionamiento del sistema fotoacústico, así como su facilidad de uso.

En las siguientes figuras se pueden apreciar diferentes mediciones representadas de forma gráfica. El vector de datos completo generado por el sistema para cada material medido puede ser consultado en el anexo.

Se debe tener en cuenta, que debido a la naturaleza de las muestras y especialmente a su color, la potencia del láser debe ser calibrada para evitar sobrecalentamientos o en casos más extremos perforaciones.

4.2 Capturas gráficas de las mediciones experimentales.

Todas las gráficas presentadas a continuación, han sido medidas mediante un barrido en frecuencia comprendido entre los 100Hz y los 10Khz, con aumentos de 100Hz cada segundo. Así mismo la señal resultante, ha sido analizada en cuatro muestras por segundo durante todo el rango.

4.2.1 Macor

Potencia del láser: 1.2 A

GRÁFICA DE MEDICIÓN DE FASE.(°)

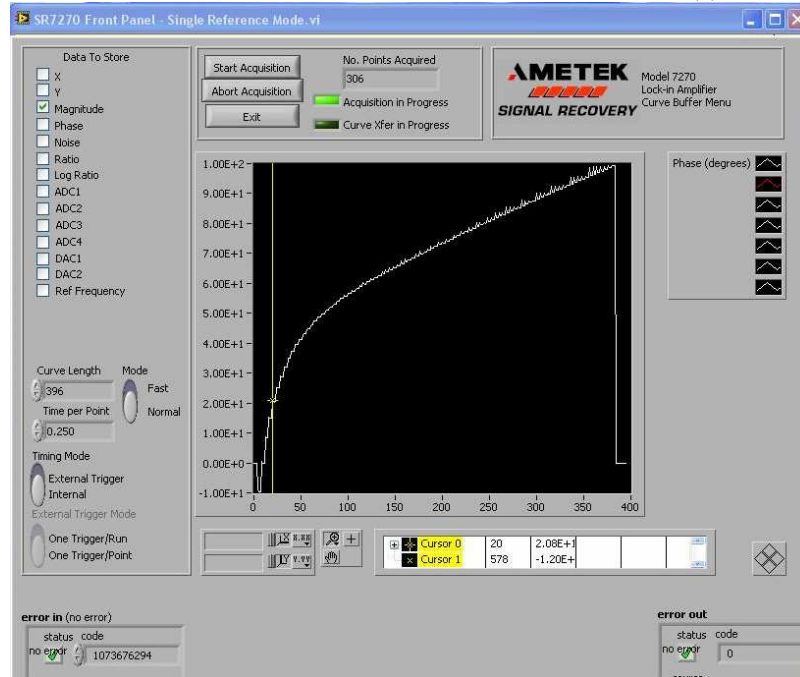


Figura 29: Curva de fase para Macor.

GRÁFICA DE MEDICIÓN EN AMPLITUD (V)

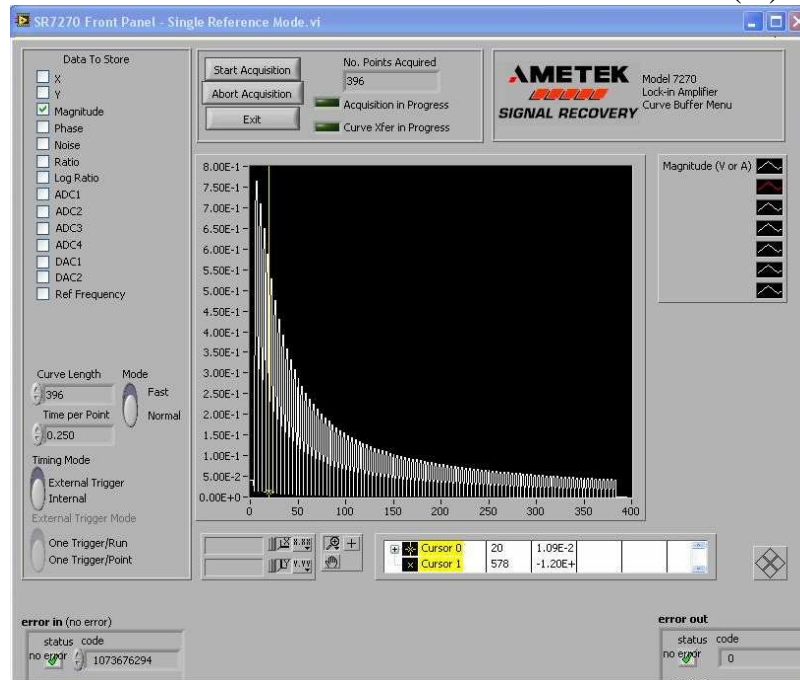


Figura 30: Curva de amplitud para Macor.

4.2.2 Acero AISI 304

Potencia del láser: 1.2 A

GRÁFICA DE MEDICIÓN DE FASE.(°)

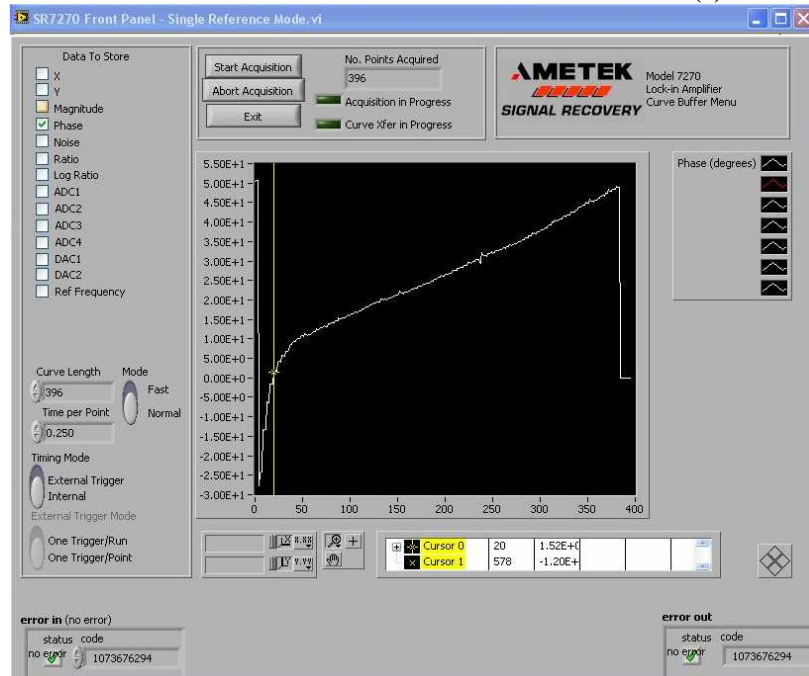


Figura 31: Curva de fase para AISI 304

GRÁFICA DE MEDICIÓN EN AMPLITUD (V)

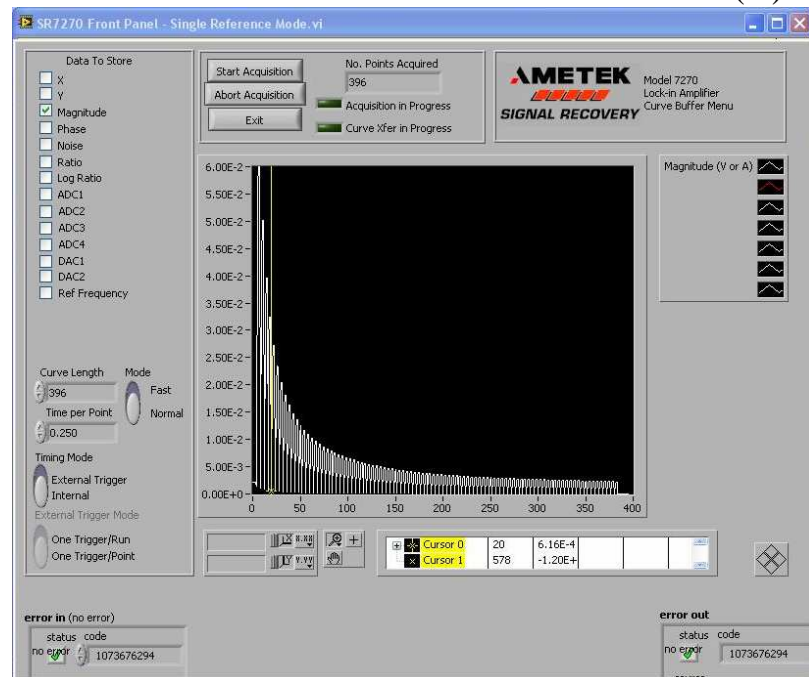


Figura 32: Curva de amplitud para AISI 304

4.2.2 Alúmina.

Potencia del láser: 1.2 A

GRÁFICA DE MEDICIÓN DE FASE.(°)

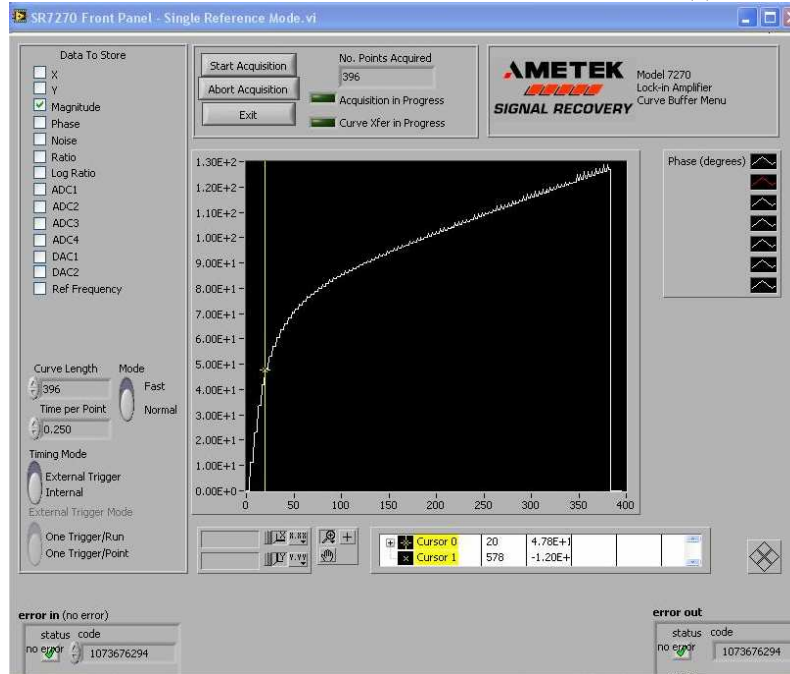


Figura 33: Curva de fase para alúmina

GRÁFICA DE MEDICIÓN EN AMPLITUD (V)

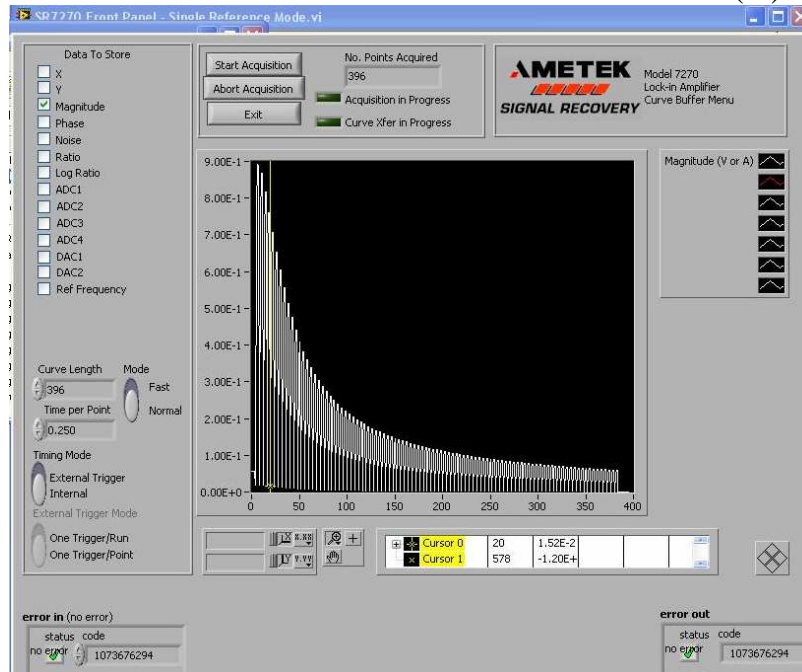


Figura 34: Curva de amplitud para alúmina.

4.2.3 Cartón óptico de alta absorbancia.

Potencia del láser: 0.5 A

GRÁFICA DE MEDICIÓN DE FASE.(°)

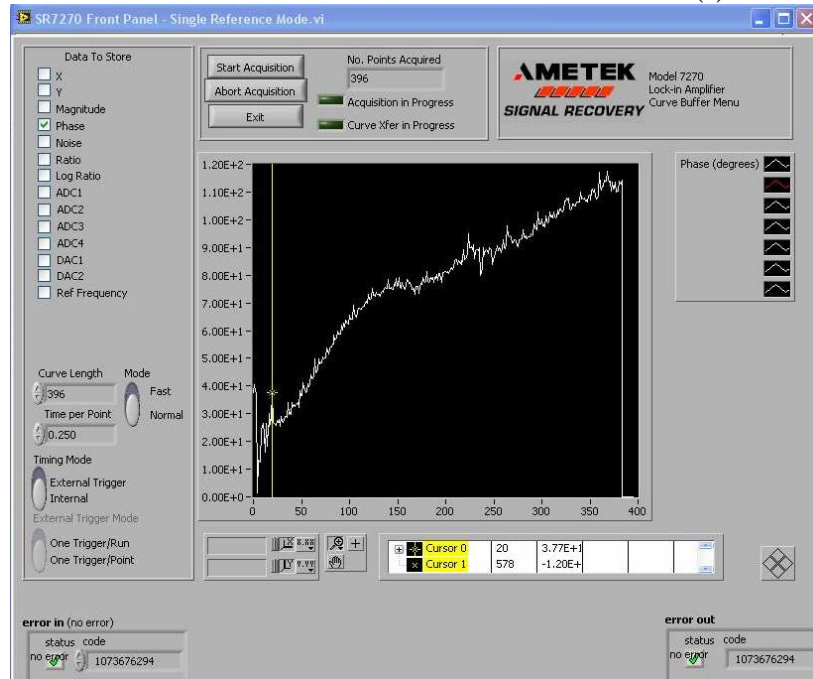


Figura 35: Curva de fase para cartón óptico

GRÁFICA DE MEDICIÓN EN AMPLITUD (V)

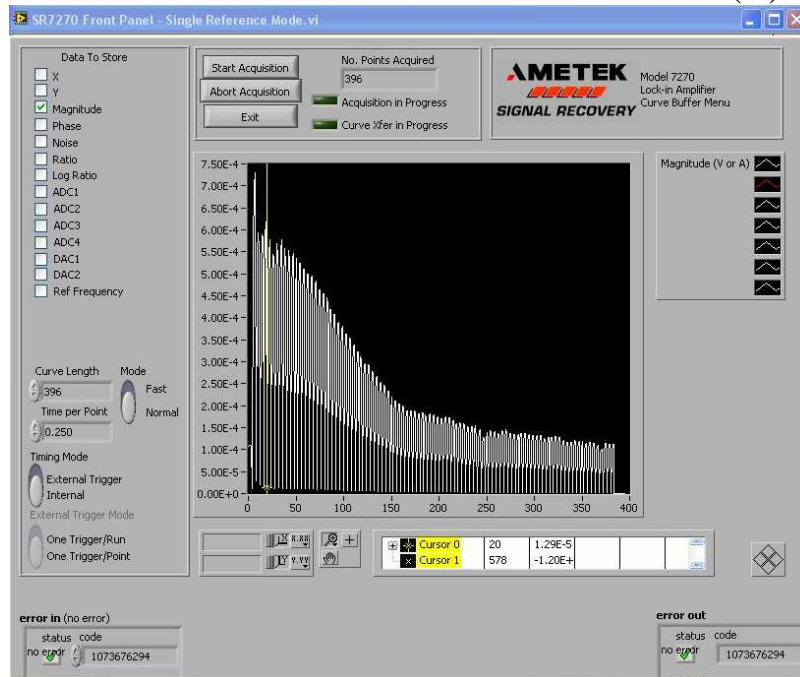


Figura 36: Curva de amplitud cartón óptico

Como se ha podido observar en las ilustraciones, los resultados de la medición en fase y amplitud, depende estrechamente de la naturaleza del material, siendo notable el cambio entre materiales blancos (Macor y Alúmnia), frente a materiales puramente negros como el cartón del alta absorbancia.

5. Aportaciones

Una vez finalizado el diseño y puesta en marcha del sistema completo, se pueden asumir como aportaciones, el diseño de un sistema de medición fotoacústico de uso sencillo e intuitivo gracias al interface de gestión gráfica.

El sistema instrumental funciona de forma prácticamente automática, siendo tan solo necesaria la introducción de los parámetros deseados para la realización de la medición experimental. Además la automatización del procesado de datos facilita la interpretación de los mismos, siendo posible la obtención de magnitudes numéricas como resultado final de la medición. El programa de cálculo simplifica enormemente la tarea de la deducción matemática relativa a cada modelo de muestras, ayudando por tanto al investigador en su tarea de caracterización, evitando en definitiva cálculos tediosos y complejos.

La optimización de la celda y del sistema instrumental para mediciones muestras de nano-hilos es de vital importancia dentro de la línea de investigación donde se ha enmarcado el proyecto y quedando así cumplido su principal objetivo.

Así mismo se ha conseguido dotar al sistema de versatilidad, quedando habilitado para futuras modificaciones relativas al ámbito de la medición fotoacústica.

6. Trabajos futuros

Con el objetivo de la mejora futura del sistema y su optimización para la medición de materiales termoeléctricos, sería posible abordar algunas modificaciones que permitan obtener nuevas variables de influencia con la que poder caracterizar los nuevos materiales.

Algunas de estas modificaciones son la medición de la luz reflejada por la muestra ante la exposición láser y comparar esta frente al ZT final del material. Para ello es necesaria la instalación de un transductor óptico capaz de medir la luz reflejada por la fibra óptica y dotar a esta de un sistema de separación de haces (ida y vuelta). La señal resultante puede ser introducida al sistema mediante los puertos ADC del SR7270 y recogida en los oportunos ficheros mediante LabView para su posterior procesado.

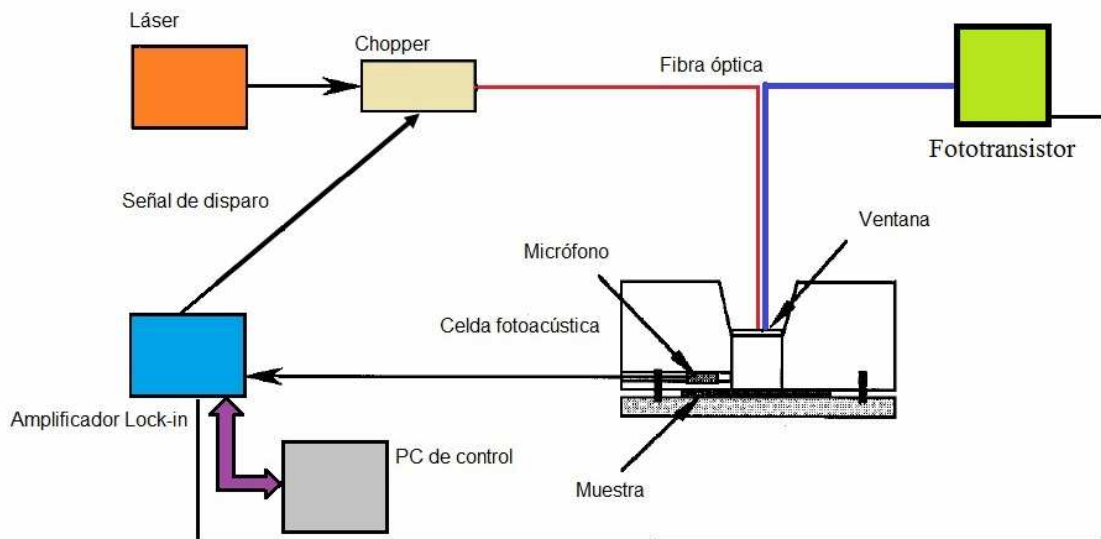


Figura 37: Esquema del sistema completo con medidor de luz reflejada

La amplia versatilidad de la técnica fotoacústica, permite realizar multitud de mediciones experimentales de magnitudes físicas, modificando tan el transductor encargado de la captura de datos, de esta forma se pueden introducir otras variables de influencia como la temperatura en los modelos para la realización de experimentos más complejos.

7. Presupuesto

7.1 Presupuesto.

Coste de materiales:

Los costes derivados de la compra de los materiales necesarios se detallan a continuación:

Amplificador Lock-in SR 7270.....	7.200€
Láser Alphaslabs LDF-10.....	4.000€
Fuente de alimentación DC.....	78€
Ordenador personal Dell Computer.....	800€
Adaptador para fibra óptica Thorlabs.....	27€
Componentes electrónicos variados.....	12€
Mecanización de celda.....	30€

Total:	12.147€
--------	---------

Referencias

- [1] NASA Oficial web page.
- [2] CRC Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano, (D. M. Rowe, Editor), CRC Press, 2005.
- [3] Dresselhaus, M. S. Et al.. Adv. Mater. 19, 1043–1053 (2007).
- [4] Hicks, L. D. and Dresselhaus, M. S. Phys. Rev. B 47, 12727–12731 (1993).
- [5] Bell, A. G., Am. J. of Sci. 20, 305 (1880).
- [6] L.B. Kreuzer. J. Appl. Phys. 42 (1971) 2934.
- [7] A. Rosencwaig. Opt. Commun. 7 (1973) 305.
- [8] A. Rosencwaig, Science 181 (1973) 657.
- [9] A. Rosencwaig and A. Gersho, science190 (1975) 556.
- [10] A. Rosencwaig and A. Gersho, J. Appl. Phys. 47 (1976) 64.
- [11] J.F. McClelland and R.N. Kniseley, Appl. Phys. Lett. 28 (1976) 467.
- [12] G.C. Wetsel Jr and F.A. McDonald, Appl. Phys. Lett. 30 (1977) 252.
- [13] Galen Wood Ewing. Analytical Instrumentation Handbook. Edit. Marcell Dekker, inc. (1994) 55-500.
- [14]] Weley WM. Wendlandt. Thermal methods of analysis. Edit. John Wiley & Sons. (1997) 140-350.
- [15] O. p. Bochkova and E. YA. Shreyder. Spectroscopic Analysis of gas mixtures. Edit. Academic Press. (1993) 23-790.
- [16] P. Korpiun and B. Büchner , J. Appl. Phys B 30 (1983) 121.
- [17] H. Hu, X. Wang, and X. Xu, J. Appl. Phys. **86**, 3953 _1999.

Anexos

Anexo A: Evaluación longitud máximo para la cámara fotoacústica en función del gas interior.

Para este estudio se han utilizado las relaciones matemáticas expresadas en el apartado 3.2 y los datos tabulados de las constantes de los gases.

El estudio ha sido realizado sobre diferentes gases nobles además del aire.

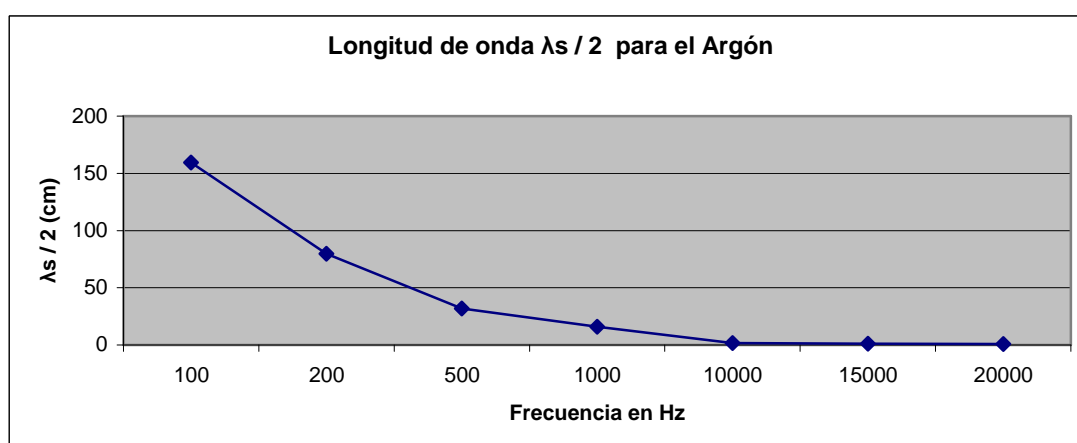
Los resultados son los que se muestran en las siguientes gráficas, derivadas todas ellas de las tablas correspondientes a cada gas, donde las diferentes columnas, representan tanto las constantes como las relaciones de las mismas con las que se obtienen los resultados finales.

Argón (Ar)

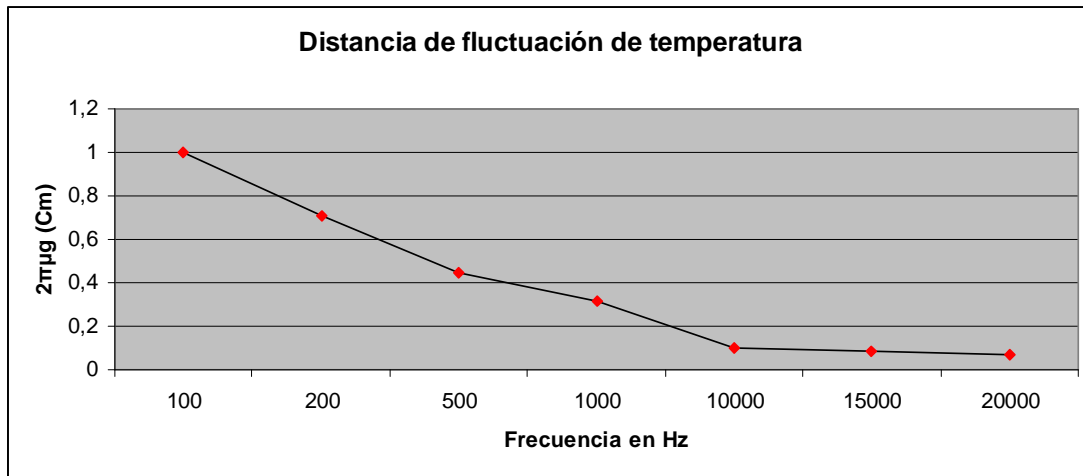
Tabla de constantes y resultados:

FREC Hz	K	ρ	C	μg	$2\pi\mu g$	$2\pi\mu g$ (Cm)	v	L	$\lambda_s / 2$ (Cm)
100	0,01772	1,784	12,5	0,00159	0,00999	0,99927	319	3,19	159,5
200	0,01772	1,784	12,5	0,00112	0,00707	0,70659	319	1,595	79,75
500	0,01772	1,784	12,5	7,11E-04	0,00447	0,44689	319	0,638	31,9
1000	0,01772	1,784	12,5	5,03E-04	0,00316	0,316	319	0,319	15,95
10000	0,01772	1,784	12,5	1,59E-04	9,99E-04	0,09993	319	0,0319	1,595
15000	0,01772	1,784	12,5	1,30E-04	8,16E-04	0,08159	319	0,02127	1,06333
20000	0,01772	1,784	12,5	1,12E-04	7,07E-04	0,07066	319	0,01595	0,7975

Gráfica de relación entre $\frac{1}{2}$ longitud de onda y frecuencia.



Relación entre frecuencia y altura máxima del pistón térmico.

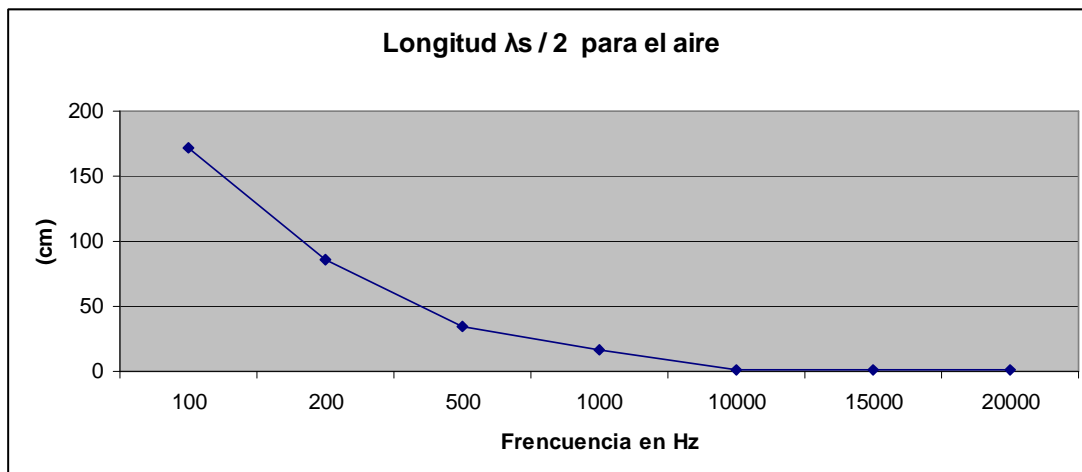


Aire

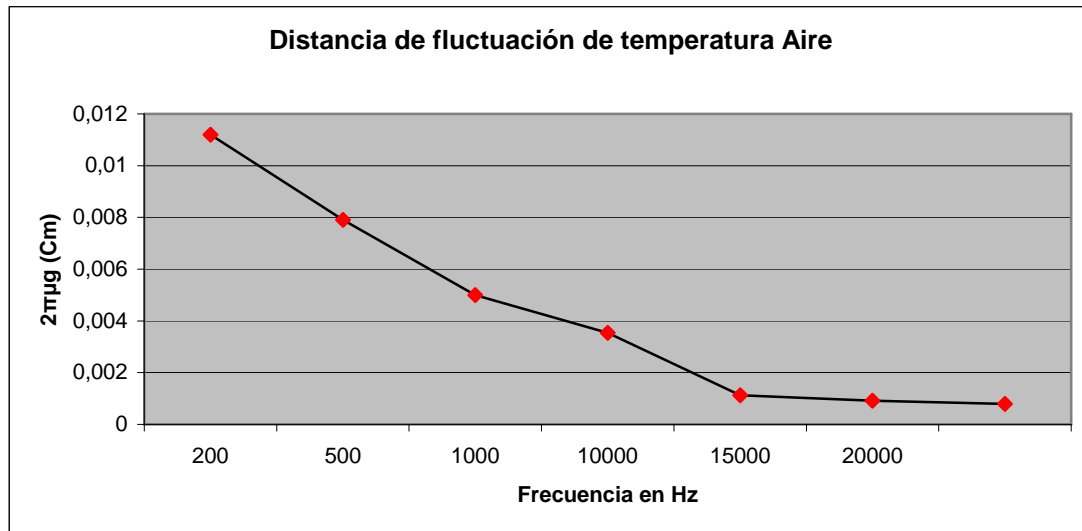
Tabla de constantes y resultados:

FREC Hz	K	ρ	C	μg	2πμg	2πμg (Cm)	v	L	λs / 2 (Cm)
100	0,025	1,204	20,85	0,00178	0,01119	1,11869	343	3,43	171,5
200	0,025	1,204	20,85	0,00126	0,00791	0,79103	343	1,715	85,75
500	0,025	1,204	20,85	7,96E-04	0,005	0,50029	343	0,686	34,3
1000	0,025	1,204	20,85	5,63E-04	0,00354	0,35376	343	0,343	17,15
10000	0,025	1,204	20,85	1,78E-04	0,00112	0,11187	343	0,0343	1,715
15000	0,025	1,204	20,85	1,45E-04	9,13E-04	0,09134	343	0,02287	1,14333
20000	0,025	1,204	20,85	1,26E-04	7,91E-04	0,0791	343	0,01715	0,8575

Gráfica de relación entre ½ longitud de onda y frecuencia.



Relación entre frecuencia y altura máxima del pistón térmico.

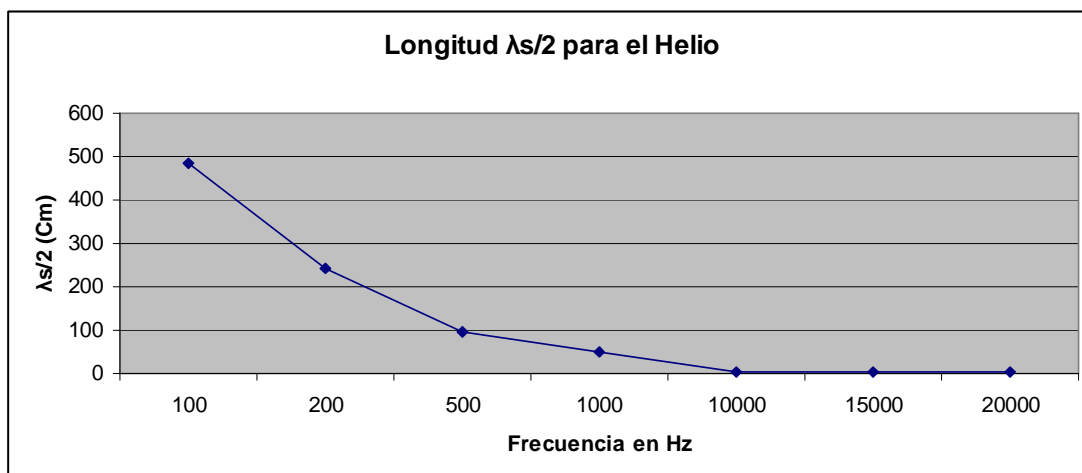


Helio (He).

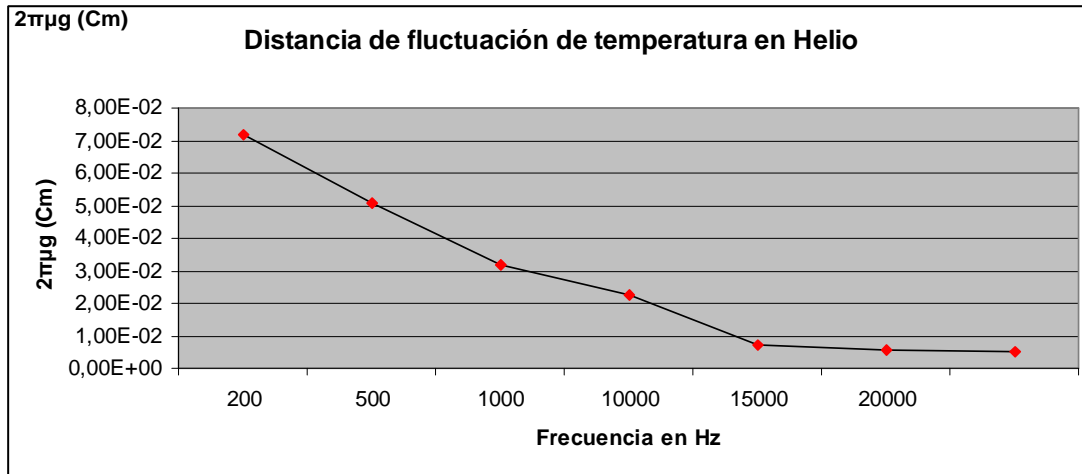
Tabla de constantes y resultados:

FREC Hz	K	ρ	C	μg	$2\pi\mu g$	$2\pi\mu g$ (Cm)	v	L	$\lambda_s / 2$ (Cm)
100	0,1513	0,1786	20,786	1,14E-02	7,16E-02	7,15646	970	9,7	485
200	0,1513	0,1786	20,786	8,05E-03	5,06E-02	5,06038	970	4,85	242,5
500	0,1513	0,1786	20,786	5,09E-03	3,20E-02	3,20E+0	970	1,94	97
1000	0,1513	0,1786	20,786	3,60E-03	2,26E-02	2,26E+0	970	0,97	48,5
10000	0,1513	0,1786	20,786	1,14E-03	0,00716	0,71565	970	0,097	4,85
15000	0,1513	0,1786	20,786	9,30E-04	5,84E-03	0,58432	970	0,06467	3,23333
20000	0,1513	0,1786	20,786	8,05E-04	5,06E-03	0,50604	970	0,0485	2,425

Gráfica de relación entre $\frac{1}{2}$ longitud de onda y frecuencia.



Relación entre frecuencia y altura máxima del pistón térmico.

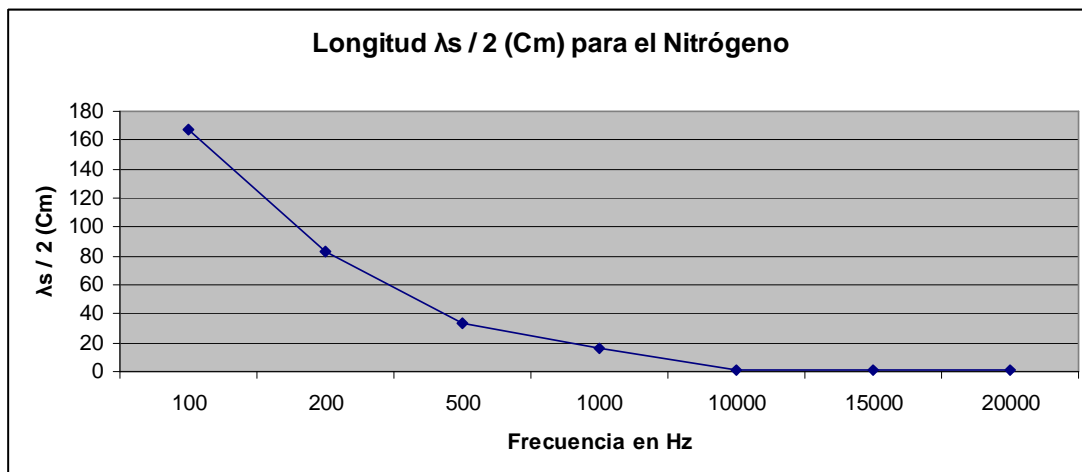


Nitrógeno (N).

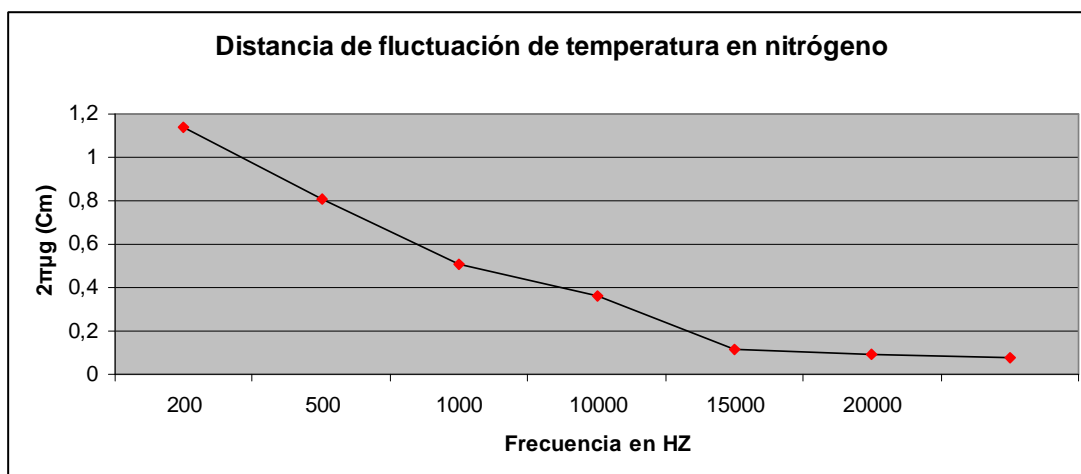
Tabla de constantes y resultados:

FREC Hz	K	ρ	C	μg	$2\pi\mu g$	$2\pi\mu g$ (Cm)	ν	L	$\lambda_s / 2$ (Cm)
100	0,0258	1,251	19,9	0,00182	0,01141	1,14119	333,6	3,336	166,8
200	0,0258	1,251	19,9	0,00128	0,00807	0,80695	333,6	1,668	83,4
500	0,0258	1,251	19,9	8,12E-04	0,0051	0,51036	333,6	0,6672	33,36
1000	0,0258	1,251	19,9	5,74E-04	0,00361	0,36088	333,6	0,3336	16,68
10000	0,0258	1,251	19,9	1,82E-04	0,00114	0,11412	333,6	0,03336	1,668
15000	0,0258	1,251	19,9	1,48E-04	9,32E-04	0,09318	333,6	0,02224	1,112
20000	0,0258	1,251	19,9	1,28E-04	8,07E-04	0,08069	333,6	0,01668	0,834

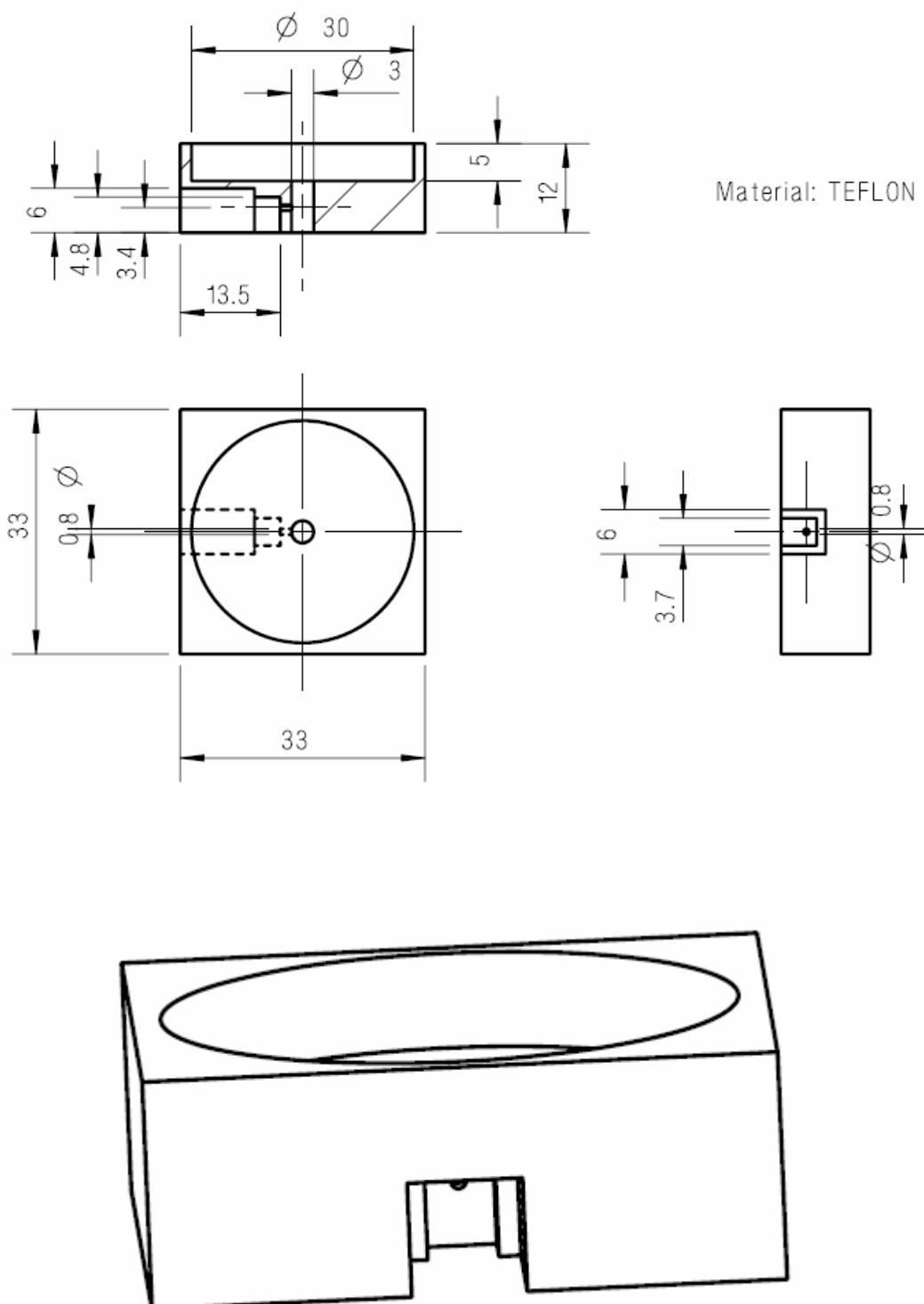
Gráfica de relación entre $\frac{1}{2}$ longitud de onda y frecuencia.



Relación entre frecuencia y altura máxima del pistón térmico.



AnexoB: Planos de fabricación de la celda fotoacústica.



Anexo C: Manual de modificaciones del programa LabView para la gestión del amplificador Lock-in Signal Recovery 7270.

En primer lugar tendremos que descargar e instalar los driver's para *Signal Recovery 7270*.

Se componen de dos partes:

- Driver VISA para comunicación USB
- Driver específico para LabView.

Se pueden descargar de la página web del fabricante o desde la página web de Nacional Instruments.

Link a la página de Signal Recovery:

[DESCARGA DRIVER'S](#)

Una vez descargados instalaremos ambos paquetes.

Inicio con LabView.

1º - Comprobación de que el 7270 está conectado al equipo y es reconocido por este.

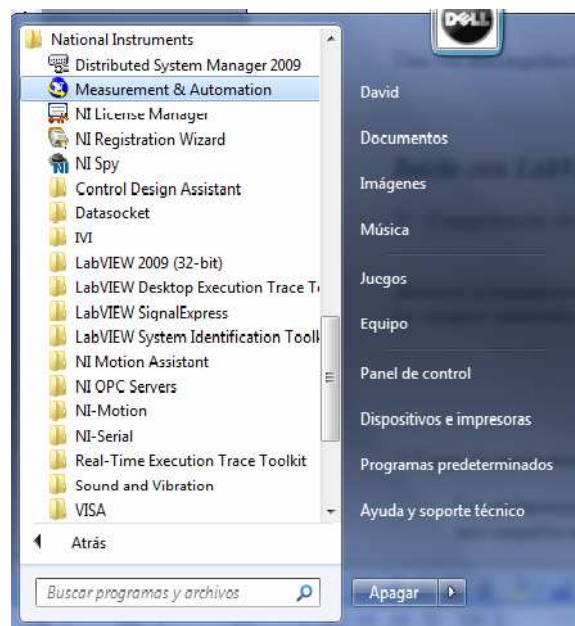
Abrimos la herramienta



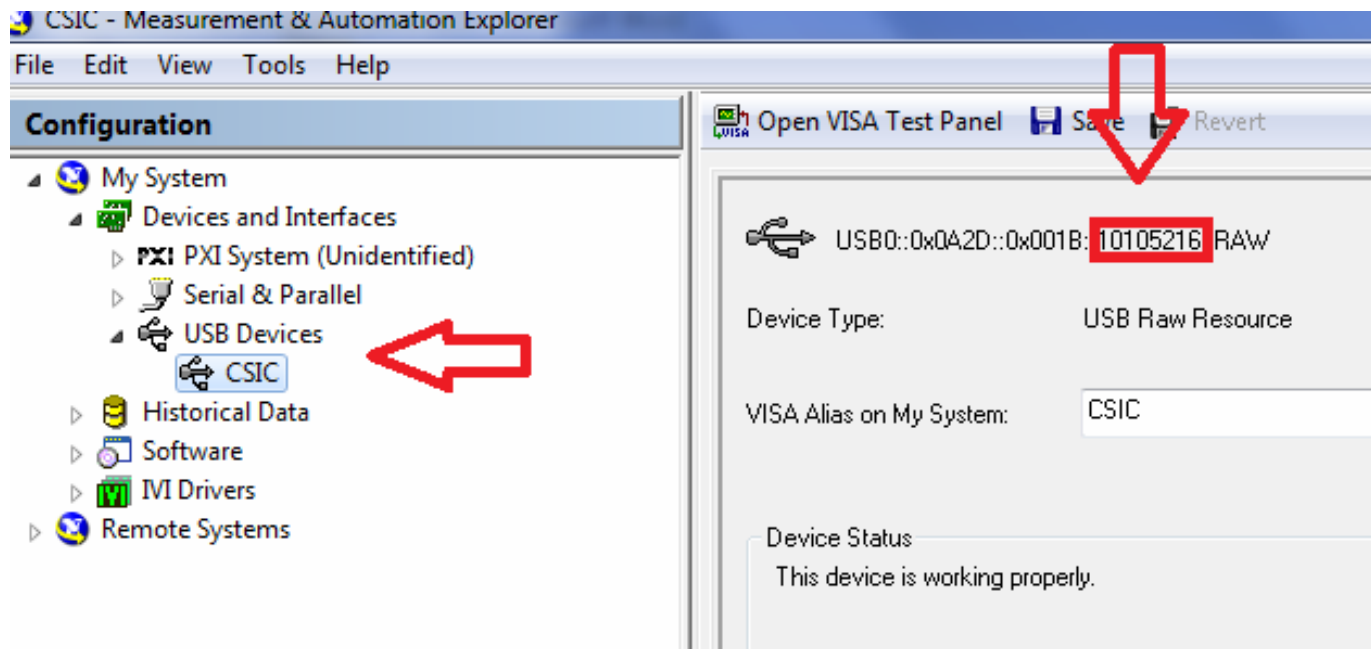
Measurement & Automation.Ink

desde la cual podremos gestionar todos

los equipos conectados a nuestro sistema.



En este punto, tendremos el 7270 conectado al equipo y encendido, si ha sido correctamente reconocido, aparecerá de la siguiente forma:



- Nota: En este caso el nombre del equipo es CSIC en lugar de 7270.

En el recuadro rojo de la derecha se indica el número de serie del USB.

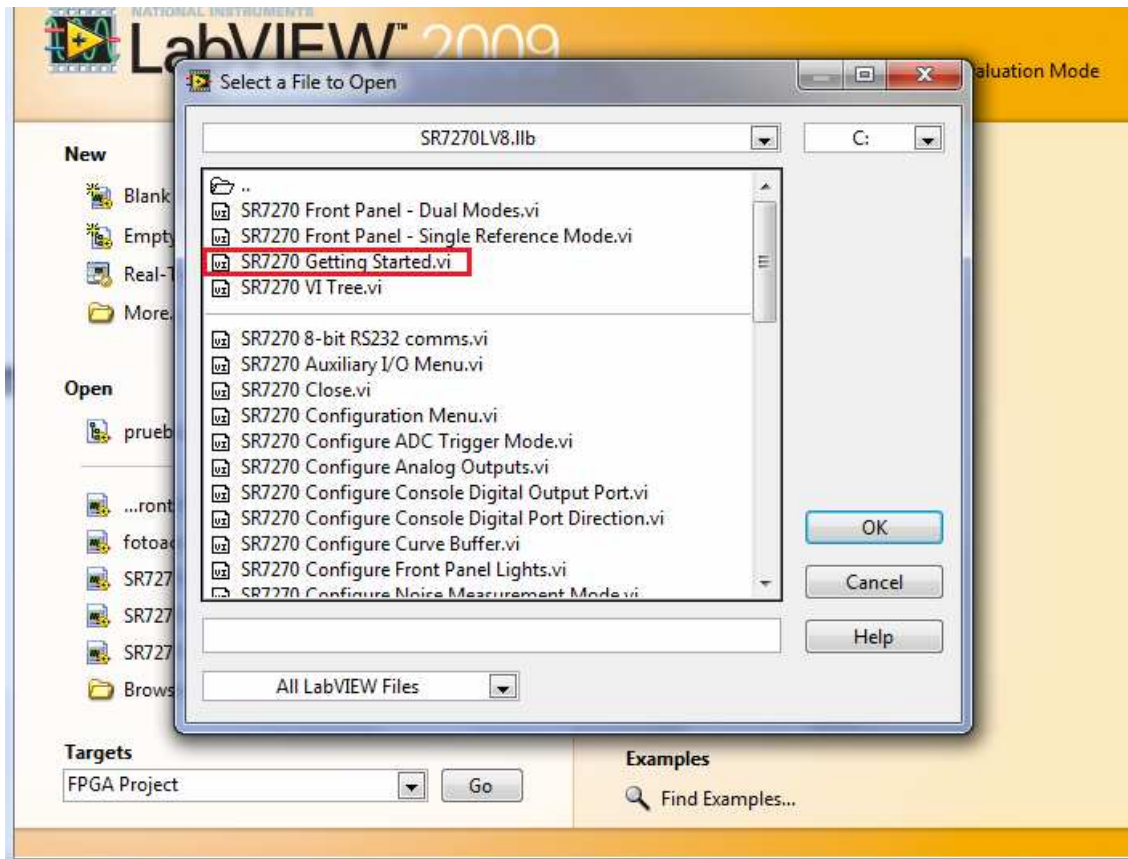
Abrimos LabView y seleccionamos el archivo descargado desde Signal Recovery con el nombre:

SR7270LV8

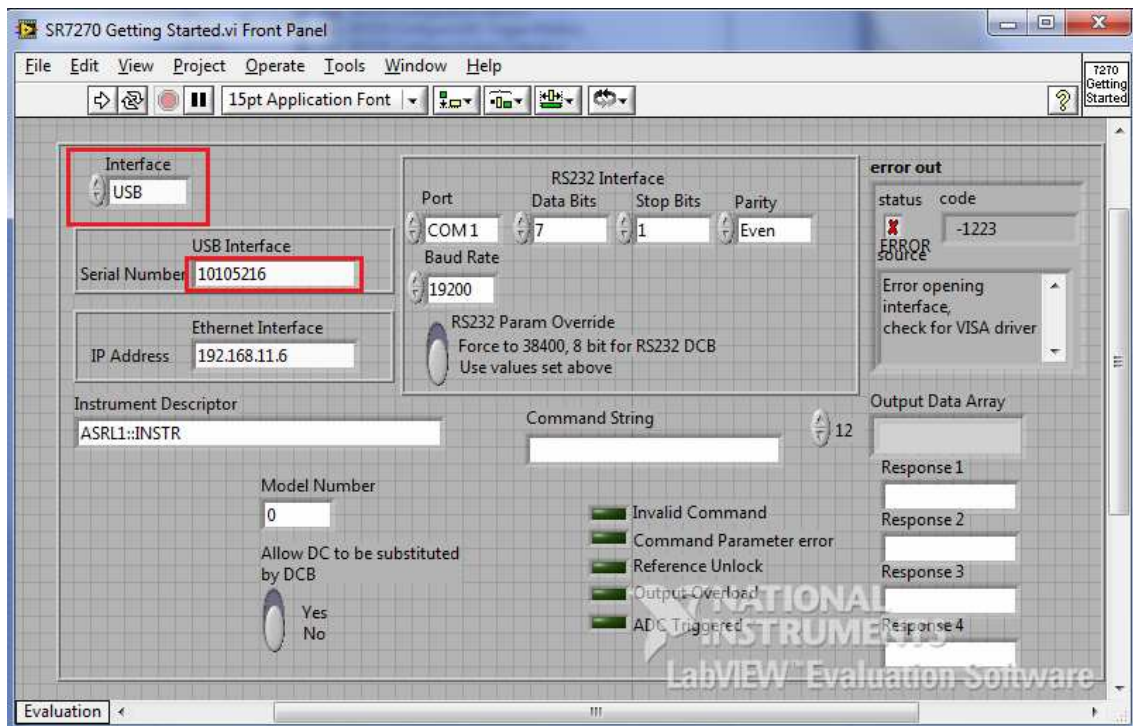
Primera modificación: configuración del interface USB.

A diferencia de la mayoría de programas, LabVIEW no autoinicializa el driver USB para comunicarse con el por lo que lo tendremos que hacer manualmente.

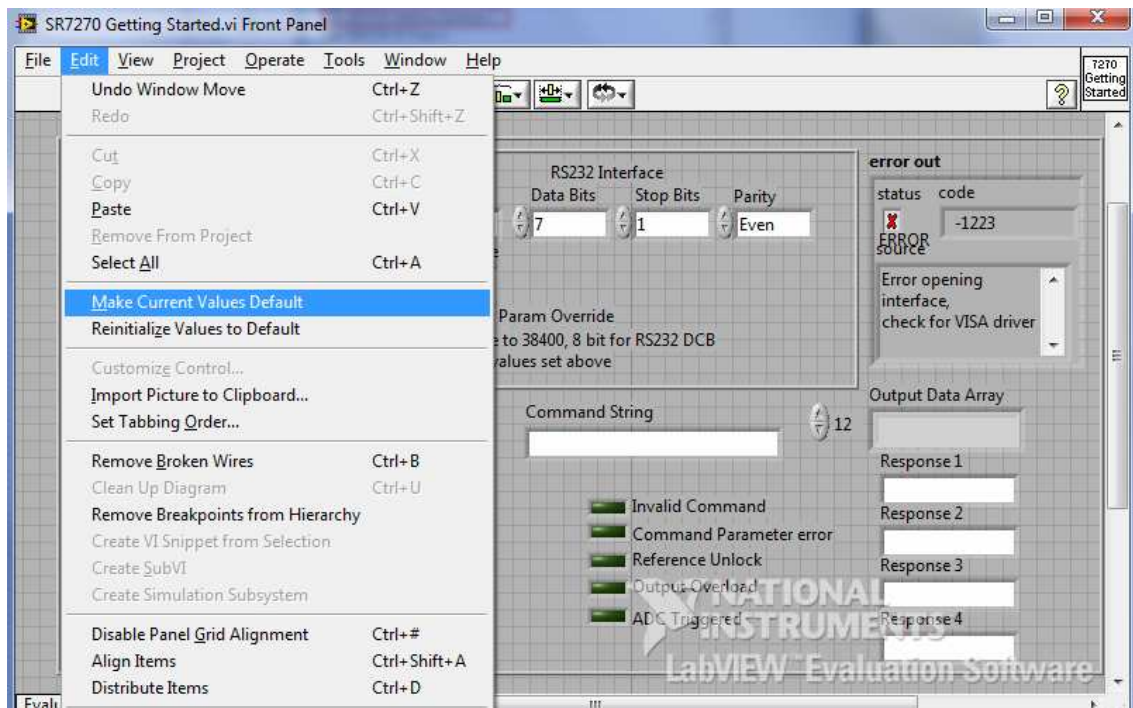
De la lista de programas que aparece seleccionamos el Getting Started.vi



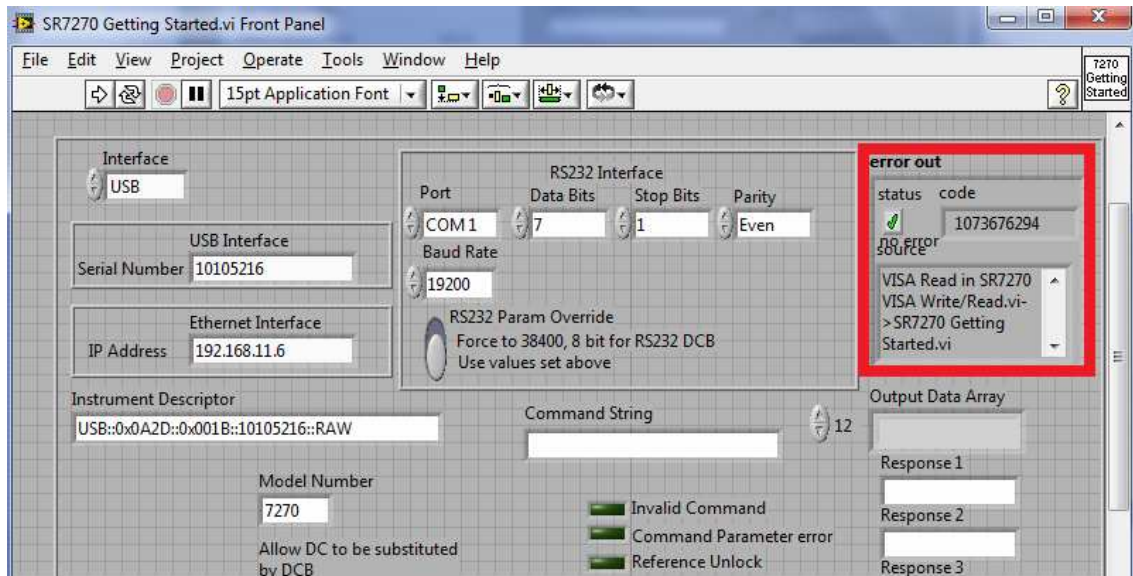
Podemos ver que aparece un error de comunicación (*-1223 error opening interface*). Para solucionarlo, seleccionamos el Interface UBS e introducimos el número de serie obtenido en el Measurement & Control.



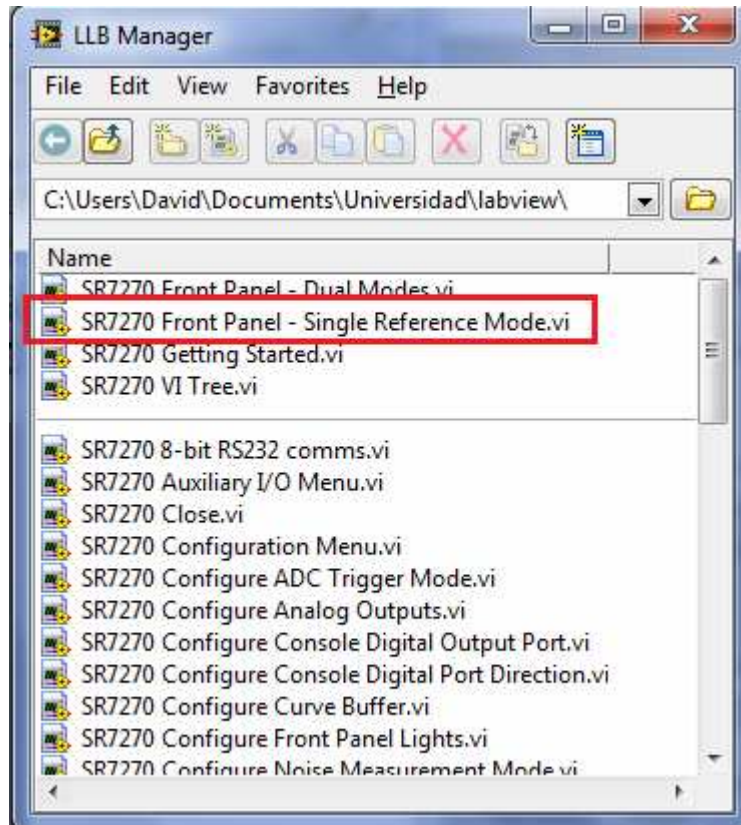
Para dejar estos valores como predefinidos, pincharemos sobre *Make Current Values Default*.



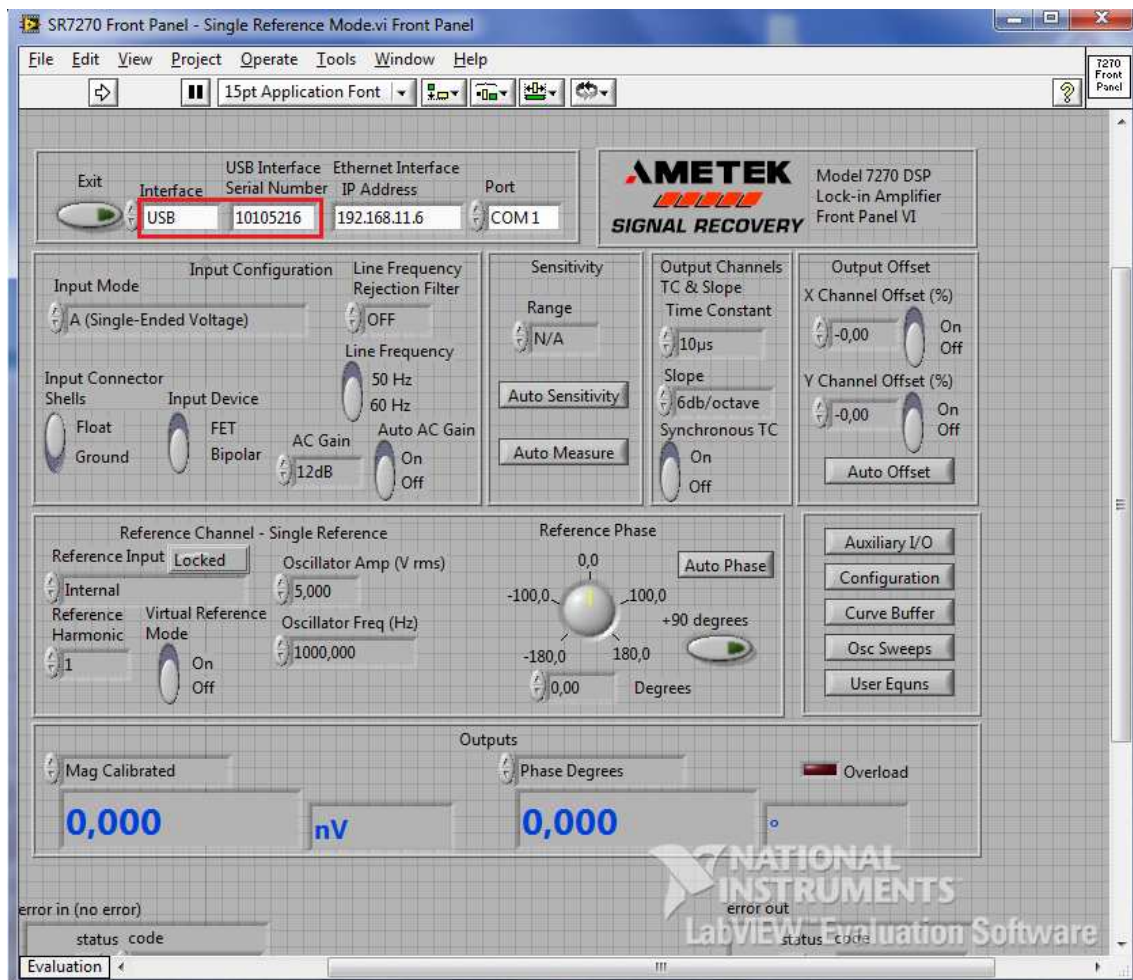
Presionando sobre RUN comprobaremos que el error desaparece y que el ordenador se comunica con el 7270. (En la pantalla del Lock-in, se iluminará la palabra *REMOTE*).



Una vez configurado el USB, podemos abrir el panel de control del instrumento. Nuevamente desde el desglose de programas del SR7270LV8, abrimos el *SR7270 Front Panel*. (nota: no abrir el “Dual mode”).



Revisaremos que los parámetros de la interface son correctos y en caso de no serlo los modificaremos.

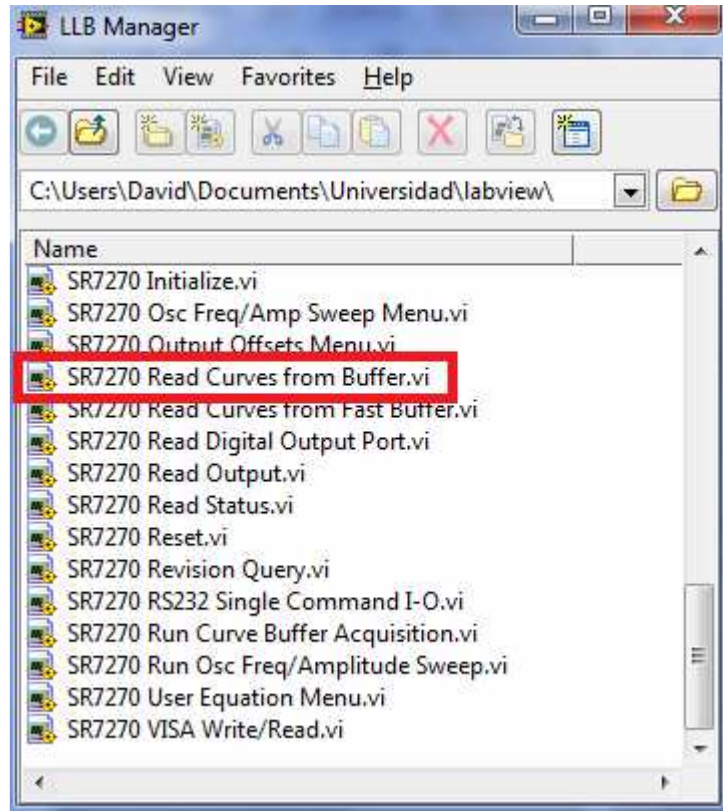


Si la configuración es correcta el programa se conectará con el Lock in sin generar errores.

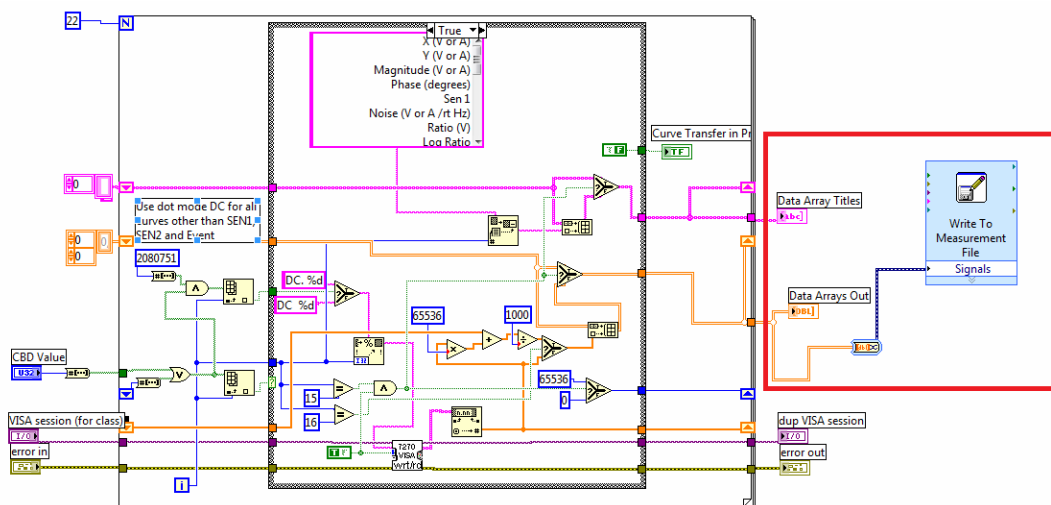
Segunda modificación: *generador de ficheros de salida (.lvm)*

Efectuaremos una modificación del programa principal para que sea capaz de volcar los datos medidos en archivos de texto.

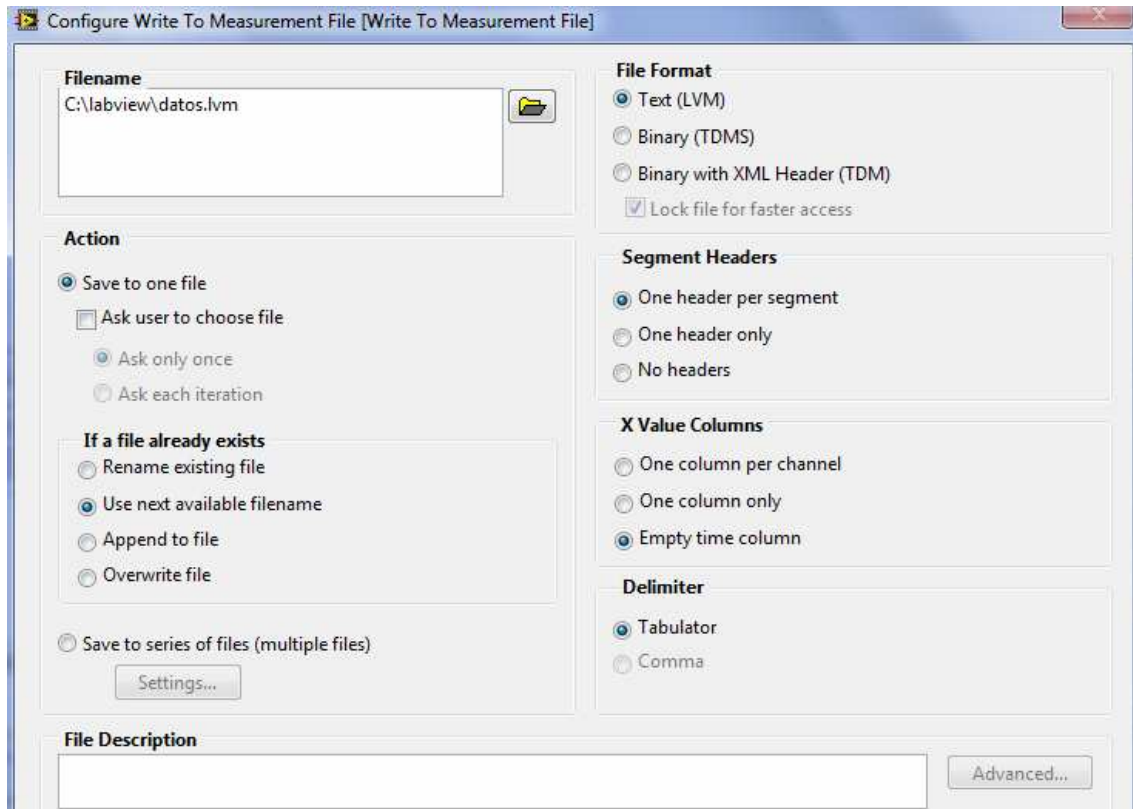
Para ello utilizaremos un elemento *Write to Measurement File*.



Una vez abierto, presionaremos Ctrl T para desplegar el circuito. Añadiremos el elemento *Write to Measurement File* en la salida del *Data Arrays out*.



Una vez instalado el elemento, podemos configurar parámetros como la ruta de destino del archivo, el formato ect.



Ahora el programa es capaz de generar archivos de texto plano con los datos seleccionados en la medida.

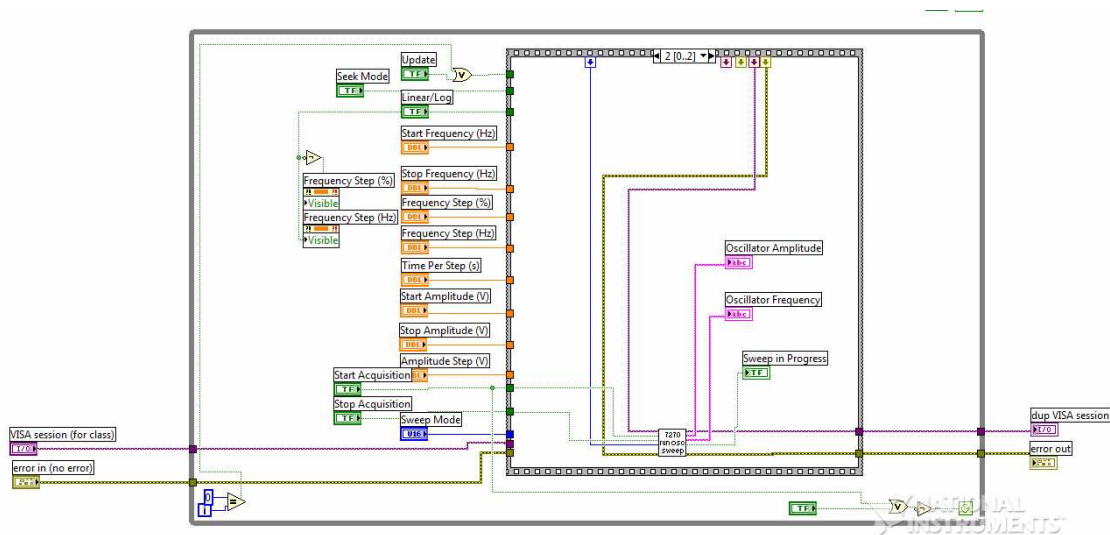
Para poder visualizarlos, basta con cambiar la extensión .lvm, a .xls o semejantes.

Tercera modificación: link to buffer virtual.

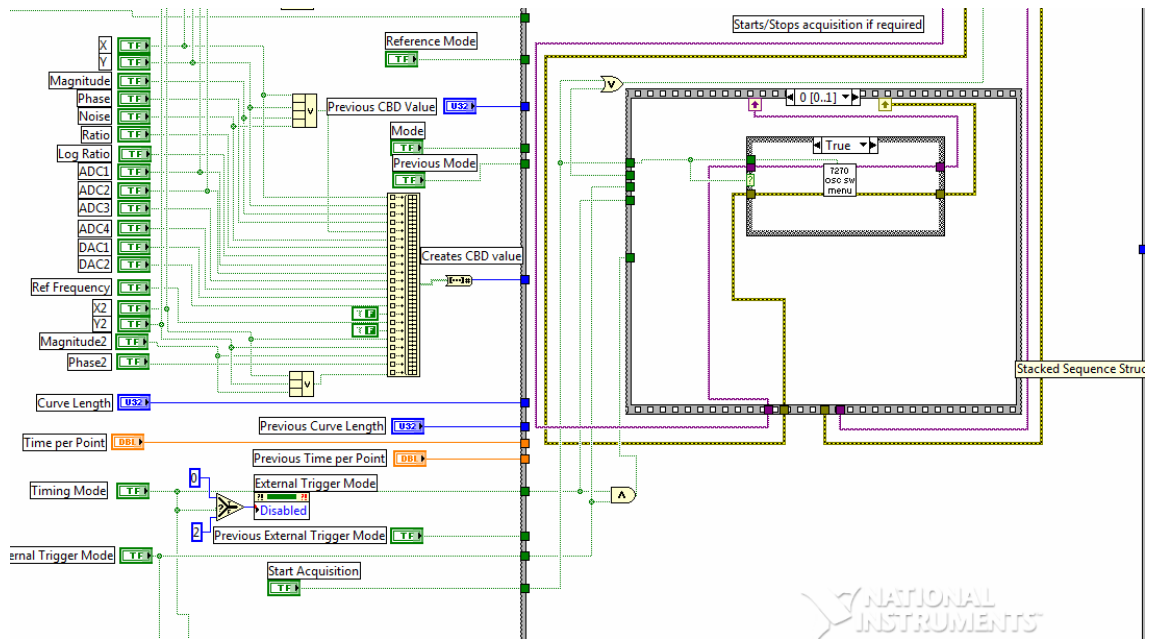
En el manejo manual del SR7270, se puede configurar el sistema para que el arranque del oscilador esté ligado al comienzo de la adquisición de datos. Esta opción es particularmente útil a la hora de realizar mediciones ya que ambas señales están sincronizadas, lo que simplifica el procesamiento de datos, ya que pasa a ser conocida la frecuencia instantánea y su desfase.

Dado que esta opción no está disponible en el gestor virtual será programada para mejorar el sistema de adquisición.

En el siguiente circuito, se puede observar la modificación del botón Star Sweep, para que una vez presionado la ventana de configuración se cierre, dando paso a la de curve buffer.



Así mismo, se ha modificado el curve buffer de tal forma que una vez presionado el botón “start acquisition”, el oscilador reciba la orden “Start sweep”, quedando así ambas señales sincronizadas.



Anexo D. Programa de cálculo matemático para resolución de las ecuaciones del modelo de XU.

MEDIDAS FOTOACÚSTICAS

Las ecuaciones para el desarrollo de este programa, han sido obtenidas del artículo: Photocacoustic characterization of carbon nanotube array thermal interfaces, B. A. Cola, J. Xu, C. Cheng, X. Xu, T.S. Fisher, H. Hu, Journal of Applied Phsics 101, 054313 (2007).

Relación de constantes. (2 to 4b)

α = Difusividad térmica.

κ = Conductividad térmica.

c_i = Calor específico

R= Resistencia térmica entre capas.

ρ = surface reflectivity

f = Frecuencia.

β = coeficiente de absorción óptica.

$\Delta\phi$ = desfase (dato experimental).

l = espesor de la capa.

$\sigma = (1+j)a_i$

n=2; (*Número de capas del sistema. Normalmente n=1 sustrato, n=2 film, n=3 nanohilos*)

(* Definimos los datos que conforman las ecuaciones*)
(*La incognita será κ_{capa} *)

$\alpha\text{value}=\{\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4,\alpha_5\};$

$\sigma\text{value}=(1+I)*\text{Sqrt}[\text{Pi}*\text{frequency}/\alpha\text{value}];$

$R\text{value}=\{R_1,R_2,R_3,R_4\};$

$\text{length}=\{l_1,l_2,l_3,l_4,l_5\};$

$\beta\text{value}=\{\beta_1,\beta_2,\beta_3,\beta_4,\beta_5\};$

$\kappa\text{data}=\{\kappa_1,\kappa_2,\kappa_3,\kappa_4,\kappa_5\};$

$\kappa\text{value}=\text{Array}[\kappa,n+2];$

$\kappa\text{data}=\{\kappa_1,\kappa_2,\kappa_3,\kappa_4,\kappa_5\};$

For[i=1,i≤n+2,i++,If[i==n, $\kappa\text{value}[[i]]=\kappa_{\text{capa}}$, $\kappa\text{value}[[i]]=\kappa\text{data}[[i]]$]]

κvalue

```

{1,κcapa,3,4}
(*Definimos los vectores que conforman cada matriz Ui y
Vi*)

u11=Array[u11i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,

u11[[i]]=(1+(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]])/(κvalue[[i]]*σvalue[[i]])-(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]]*Rvalue[[i]]))*Exp[-σvalue[[i+1]]*length[[i+1]]]
]

u12=Array[u12i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
u12[[i]]=(1-(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]])/(κvalue[[i]]*σvalue[[i]])+(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]]*Rvalue[[i]]))*Exp[+σvalue[[i+1]]*length[[i+1]]]
]

u21=Array[u21i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
u21[[i]]=(1-(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]])/(κvalue[[i]]*σvalue[[i]])-(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]]*Rvalue[[i]]))*Exp[-σvalue[[i+1]]*length[[i+1]]]
]

u22=Array[u22i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,

u22[[i]]=(1+(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]])/(κvalue[[i]]*σvalue[[i]])+(κvalue[[i+1]]*σvalue[[i+1]]*Rvalue[[i]]))*Exp[+σvalue[[i+1]]*length[[i+1]]]
]

v11=Array[v11i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
v11[[i]]=1+(βvalue[[i]]/σvalue[[i]])
]

v21=Array[v21i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
v21[[i]]=1-(βvalue[[i]]/σvalue[[i]])
]

v12=Array[v12i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
v12[[i]]=(-1-(κvalue[[i+1]]*βvalue[[i+1]])/(κvalue[[i]]*σvalue[[i]])+(κvalue[[i+1]]*βvalue[[i+1]]*Rvalue[[i]]))*Exp[-βvalue[[i+1]]*length[[i+1]]]
]

```

```

v22=Array[v22i,n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
  v22[[i]]=(-
1+(κvalue[[i+1]]*βvalue[[i+1]])/(κvalue[[i]]*σvalue[[i]])+(
κvalue[[i+1]]*βvalue[[i+1]]*Rvalue[[i]])*Exp[-
βvalue[[i+1]]*length[[i+1]]]
]

```

```

u12[[1]] (* verificamos el resultado del vector *)

```

$$e^{(9+9i)\sqrt{5}\pi} \left(1+i\sqrt{\frac{3-e}{2}} \kappa_{\text{capa}} + (5+5i)\sqrt{5}\pi \kappa_{\text{capa}}\right)$$

```

(*Definimos las matrices U y V*)

```

```

Ui=Array[MatrixForm[Array[Umat_#&, {2,2}]],n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
  Ui[[i]]={{0.5*u11[[i]],0.5*u12[[i]],{0.5*u21[[i]],0.5*u22[
[i]]}}}
]

```

```

Vi=Array[MatrixForm[Array[Vmat_#&, {2,2}]],n+1];
For[i=1,i<n+2,i++,
  Vi[[i]]={{0.5*v11[[i]],0.5*v12[[i]],{0.5*v21[[i]],0.5*v22[
[i]]}}}
]

```

```

Ui[[2]];
MatrixForm[Vi[[1]]]; (*Quitar el punto y coma si se quiere
ver el desarrollo algebraico*)

```

```

(*Definimos las relaciones Gm y Em*)

```

```

Gm[counter_]:=Piecewise[{{
  (((βvalue[[counter]]*I0)/(2*κvalue[[counter]]))*Exp[-
(Sum[(βvalue[[p]]*length[[p]]),{p,counter+2,n}]]
  )),counter<=n},
{
  (((βvalue[[counter]]*I0)/(2*κvalue[[counter]]))),counter==n
},
{0,counter>n}]]

```

```

Gm[4]

```

```

BNmas1[κcapa_]=Det[({{0,1}}.(Sum[
  (Product[
    If[i==m, {{1,0},{0,1}},Ui[[i]]],{i,1,m-1}

```

```

    ]).Vi[[m]].{1/(((βvalue[[m]])^2)-
(σvalue[[m]])^2)}, {1/(((βvalue[[m+1]])^2)-
(σvalue[[m+1]])^2)}, {m,1,n}]]))/
    ({0,1}.Product[Ui[[i]],{i,1,n}].{0,1}]]

FindMinimum[Im[BNmas1[x]]/Re[BNmas1[x]]-
Tan[Δφ+Pi/4],{x,0.0001}]

(*Δφ[κcapa_]:=Arg[BNmas1]-Pi/4*)

(*Introducir el valor de las distintas variables que vamos
a utilizar*)
(*
1 = sustrato
2 = capa 1
3 = capa 2
capa n+2 = aire
*)

frequency=10;
(* Modulating frequency. UNITS: Herz *)

α1=1E-3; α2=2; α3=3; α4=4Difusividad térmica en la capa n
*)

R1=5;R2=6;R3=7; (* Resistencia térmica entre capas n y
n+1.*)

l1=8;l2=9;l3=10;l4=11;(* Longitud en altura de cada capa.
l(n+1)=0.*)

β1=12;β2=13;β3=14;β4=15;(* Coeficiente de absorción óptica
capa n.*)

Io=16; (* Intensidad lumínica*)

κ1=1; κ2=2;κ3=3;κ4=4;(*Conductividad térmica entre capas*)

(*vctes={1,2,3};
vctes[[2]];
βctes={3,4,5};
χctes={6,7,8};
For[i=1,i<n+1,i++,Vmat[[i]]={vctes[[i]],βctes[[i]]},{vctes
[[i]],χctes[[i]]}]
Vmat[[2]]
κvalue[[1]])*)

```


Anexo E. Catálogo micrófono: SPM0408HE5H



SPM0408HE5H

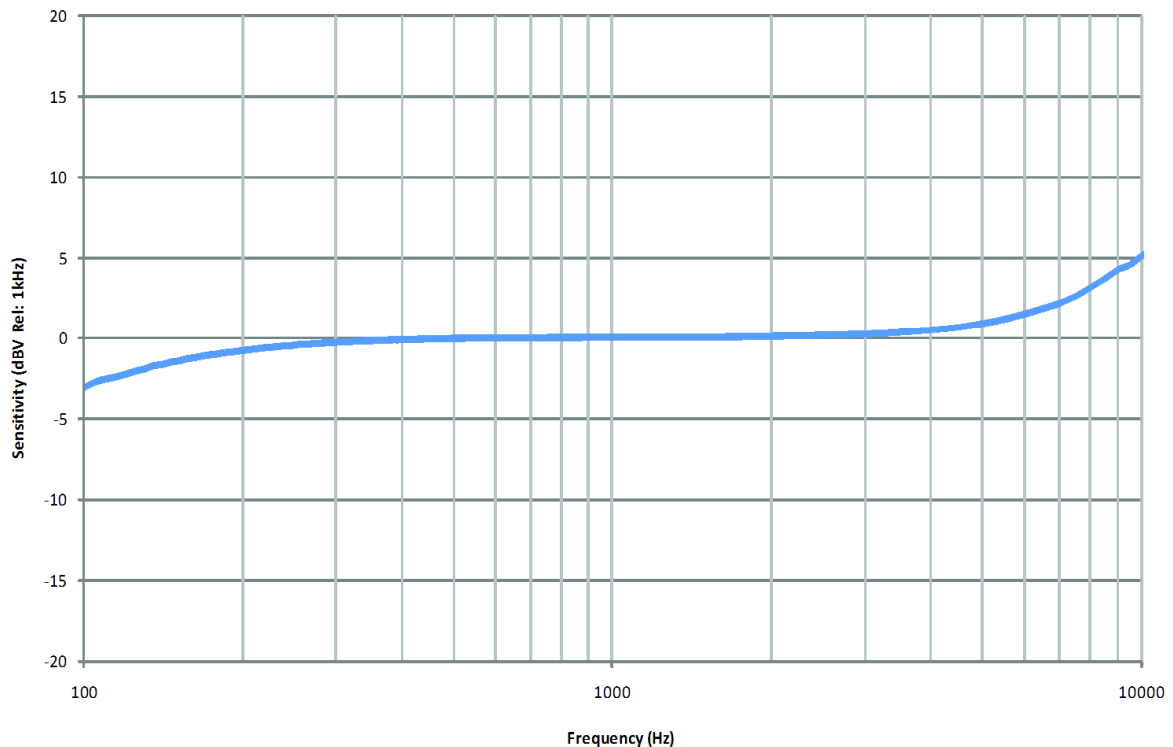
4. ACOUSTIC & ELECTRICAL SPECIFICATIONS

TEST CONDITIONS: +20 °C, 60-70% R.H.

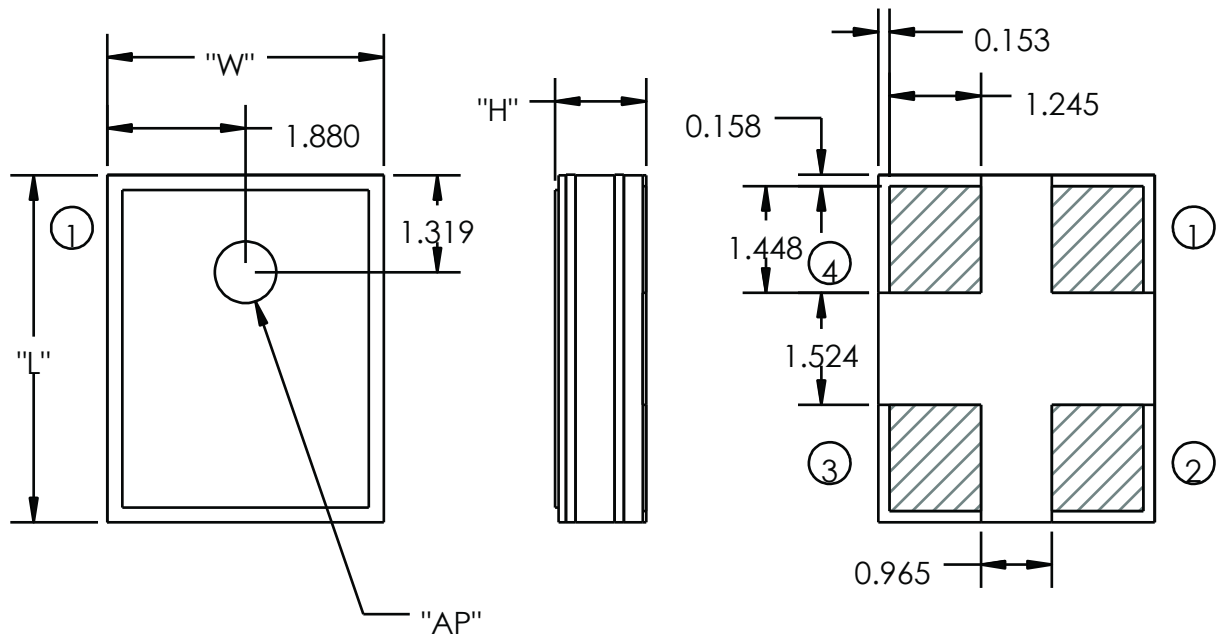
	Symbol	Condition	Limits			Unit
			Min.	Nom.	Max.	
Directivity		Omni-directional	—	—	—	
Sensitivity	S	@ 1kHz (0dB-1V/Pa)	-26	-22	-18	dB
Output Impedance	Z _{OUT}	@ 1kHz (0dB-1V/Pa)	—	—	300	Ω
Current Consumption	I _{DDs}	Across 1.5 to 3.6 volts	100	—	350	μA
Signal to Noise Ratio	S/N	@ 1kHz (0dB-1V/Pa)	55	59	—	dB
Supply Voltage	V _s		1.5	—	3.6	V
Typical Input Referred Noise	ENL	A-weighted	—	35	—	dBA SPL
Sensitivity Loss Across Voltage		Change in sensitivity over 3.6V to 1.5V	No Change Across Voltage Range			dB
Maximum Input Sound Level		At 100dB SPL, THD < 1% At 115dB SPL, THD ≤ 10%				

5. FREQUENCY RESPONSE CURVE

Typical Free Field Response
NORMALIZED TO 1kHz, C1 = 2.2μF



6. MECHANICAL SPECIFICATIONS



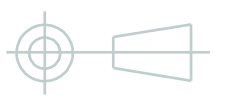
ITEM	DIMENSION	TOLERANCE	UNITS
LENGTH (L)	4.720	±0.100	mm
WIDTH (W)	3.760	±0.100	mm
HEIGHT (H)	1.250	±0.100	mm
ACOUSTIC PORT (AP)	Ø0.838	±0.100	mm

PIN OUTPUT	
PIN #	FUNCTION
1	OUTPUT
2	GAIN
3	GROUND
4	POWER (Vdd)

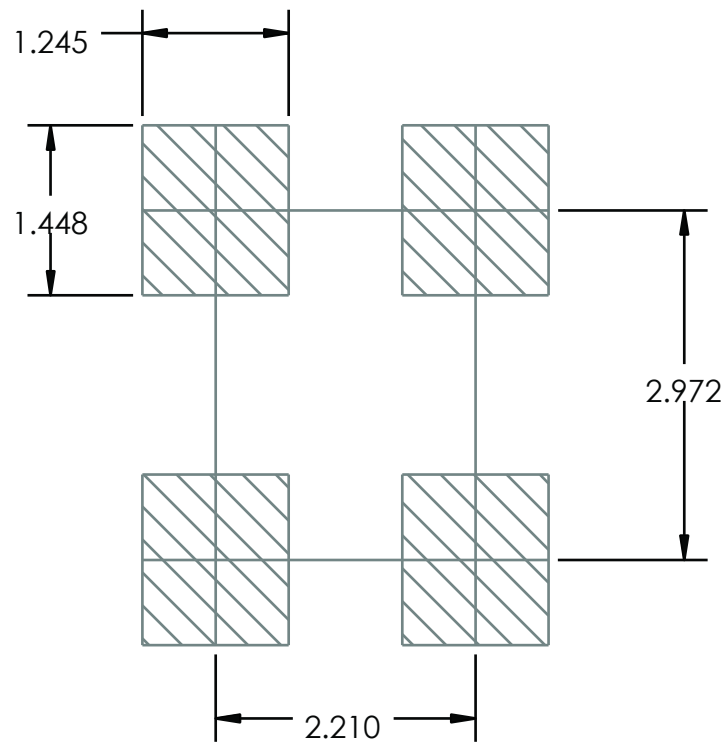
Note:

Dimensions are in millimeters unless otherwise specified.

Tolerance ±0.15mm unless otherwise specified.



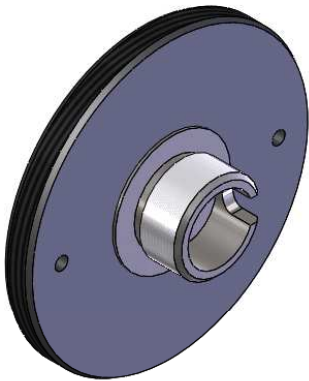
7. RECOMMENDED CUSTOMER LAND PATTERN



8. RECOMMENDED SOLDER STENCIL PATTERN

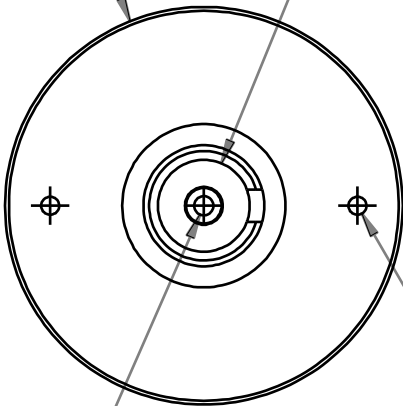
N/A

Anexo F. Adaptador para fibra óptica.



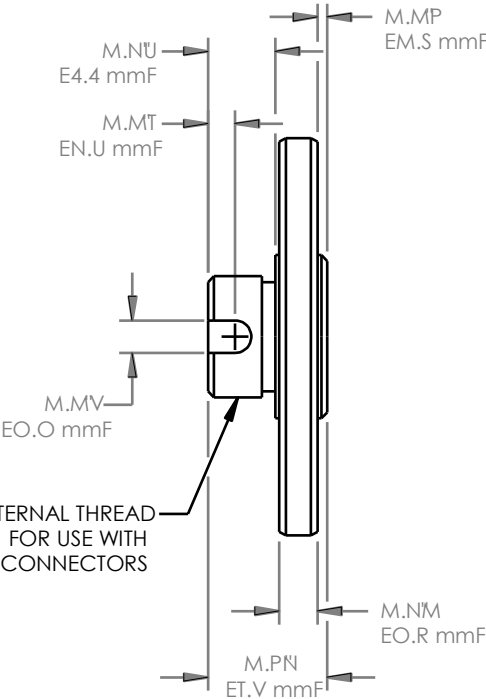
Ø N.MPR 1/4" M THREAD
FOR USE WITH
THORLABS N.MM" ESMNF SERIES LENS TUBES

Ø M.O 1/4" Ø S.N mmF CBORE
M.N4" EP.S mmF DEEm



SmANNER WRENCH SLOTS
FOR USE WITH
THORLABS SmWUMNC SmWVMV

Ø M.MRE Ø N.P mmF THRU HOLE



M.N'U
E4.4 mmF

M.MT
EN.U mmF

M.MV
EO.O mmF

MUXM.TR mm EXTERNAL THREAD
FOR USE WITH
STANDARD FC CONNECTORS

M.MP
EM.S mmF

M.N'M
EO.R mmF

M.PN
ET.V mmF

NAME	DATE
REDRAWN	CS
DRAWN	JT
ENG AmmR.	JT
MFG AmmR.	AC

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
DRAWING IS THE SOLE mROmERTY OF
THORLABSI INC. ANY RemRODUCTION
IN mART OR AS A WHOLE WITHOUT
THE WRITTEN mERMISSION OF
THORLABSI INC. IS mROHIBITED.

THORLABS INC.		mO BOX PSS NEWTON NJ	
TITLE		SMN FC FIBER ADAmTER	
MATERIAL		NLA	SIZE A
SCALEW OWN		SHEET N OF N	
DRAWING #		mART #	
MVNNJEMN		SMNFC	

4.1 Front Panel

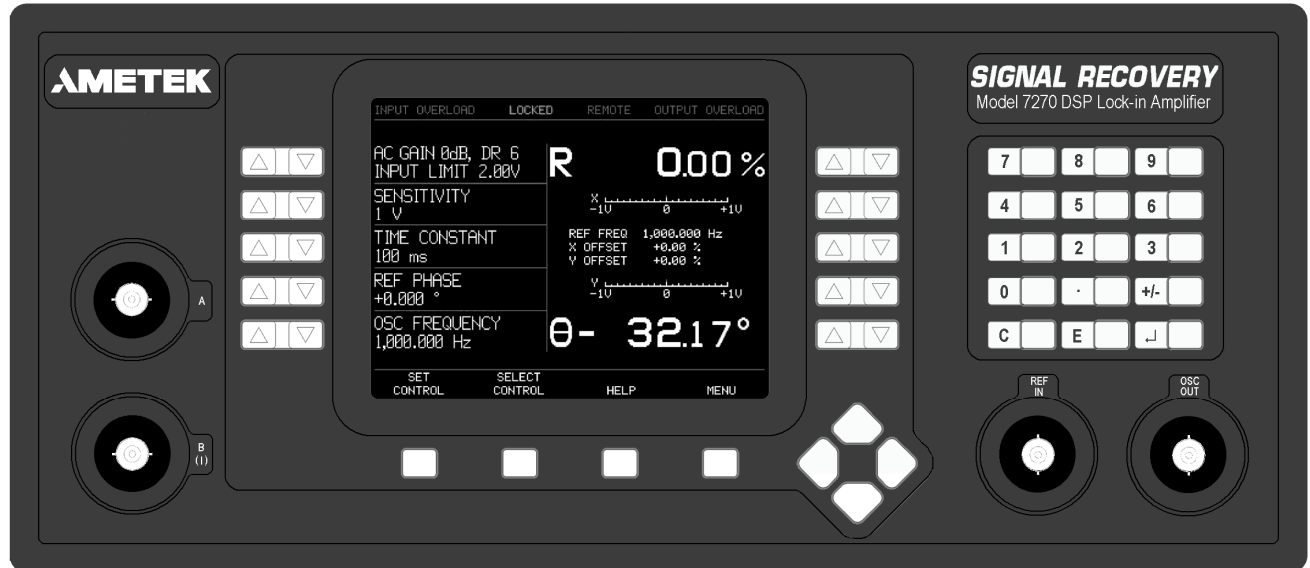


Figure 4-1, Model 7270 Front Panel Layout

As shown in figure 4-1, the model 7270's front panel has four BNC connectors, a 320 × 240 pixel color LCD display panel, ten double and four single keys positioned adjacent to the screen, four cursor-movement keys and a 12-button keypad. The following sections describe the function and location of these items.

4.1.01 A and B (I) Signal Input Connectors

The A connector is the signal input connector for use in single-ended and differential voltage mode. The B (I) connector is the signal input connector for use in differential voltage mode (A-B) and for inverting single-ended voltage mode (mode). It is also the signal input connector when the current input mode is selected.

When either input is overloaded the words INPUT OVERLOAD, in the top left-hand corner of the screen, flash.

4.1.02 REF IN Connector

This is the general-purpose input connector for an external reference signal.

NOTE: If the best possible phase accuracy at low external reference frequencies is required, then a TTL reference signal should be applied to the rear panel TTL REF IN input instead.

When external reference mode is selected the word LOCKED appears in highlighted text along the top edge of the screen. Under unlock conditions the word UNLOCKED flashes.

4.1.03 OSC OUT Connector

This is the output connector for the internal oscillator.

4.1.04 LCD Screen

This screen, the five pairs of keys on each side of it and the four keys under it are

Specifications

Appendix A

Measurement Modes

X	In-phase	—	
Y	Quadrature	—	
R	Magnitude	—	
θ	Phase Angle	—	
	Noise	—	
	Harmonic	nF, n \leq 127	
	Dual Harmonic	Simultaneously measures the signal at two different harmonics F and \bar{F} of the reference frequency	
	Dual Reference	Simultaneously measures the signal at two different reference frequencies, F and \bar{F} where F is the internal and \bar{F} the external reference.	
	Tandem Reference	A variation of the Dual Reference mode, where the signal is demodulated using the internal reference frequency F , and the resulting X1 channel output is passed to a second demodulator running at an external reference frequency \bar{F}	
	Virtual Reference	Locks to and detects a signal without a reference (100 Hz \leq F \leq 250 kHz)	
	Noise	Measures noise in a given bandwidth centered at the reference frequency F	
	Spectral Display	Gives a visual indication of the spectral power distribution of the input signal in a user-selected frequency range lying between 1 Hz and 250 kHz. The display is calibrated for frequency, but not amplitude, and is intended to assist in choosing the best reference frequency.	

Display

320×240 pixel (¼ VGA) color TFT display panel giving digital, analog bar-graph and graphical indication of measured signals. Menu system with dynamic key function allocation.

Signal Channel

Voltage Inputs	
Modes	A only, -B only or Differential (A-B)
Frequency Response	0.001 Hz \leq 250 kHz
Full-scale Sensitivity	2nV to 1 V in a 1-2-5 sequence (e.g. 2 nV, 5 nV, 10 nV)
Input Impedance	
FET Input	10 M Ω // 25 pF, AC or DC coupled
Bipolar Input	10 k Ω // 25 pF, input must be DC coupled
Maximum Safe Input	1.0 V
Voltage Noise	5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz
C.M.R.R.	>100 dB @ 1 kHz degrading by no more than 6 dB/octave with increasing frequency
Gain Accuracy	$\pm 0.0\%$ typ, $\pm 0.5\%$ max.
Distortion	-60 dB THD (60 dB AC gain, 1 kHz)
Current Input	
Mode	Low Noise (10 ⁸ V/A) or Wide Bandwidth (10 ⁶ V/A)
Full-scale Sensitivity	
Low Noise	2 fA to 10 nA in a 1-2-5 sequence
Wide Bandwidth	2 fA to 1 μ A in a 1-2-5 sequence
Frequency Response (-3dB)	
Low Noise	0.001 Hz \leq 500 Hz minimum
Wide Bandwidth	0.001 Hz \leq 50 kHz minimum
Impedance	
Low Noise	< 2.5 k Ω @ 100 Hz
Wide Bandwidth	< 250 Ω @ 1 kHz
Noise	
Low Noise	13 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 500 Hz
Wide Bandwidth	130 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz
Gain Accuracy	$\pm 2.0\%$ typ, midband
Either Input Mode:	
Max. Dynamic Reserve	> 100 dB
Line Filter	Filter can be set to attenuate 50/60 Hz, 100/120 Hz, or both frequency bands
Grounding	BNC shields can be grounded or floated via 1 k Ω to ground
Signal Monitor	
Amplitude	$\pm 0.1\%$ V FS. This is the signal after preamplification and filtering, immediately prior to the main ADC
Output Impedance	1 k Ω

Reference Input

TTL Input (rear panel)	
Frequency Range	0.001 Hz to 250 kHz
Analog Input (front panel)	
Impedance	1 M Ω // 30 pF
Sinusoidal Input	
Level	1.0 V rms

Frequency Range	0.3 Hz to 250 kHz
Squarewave Input	
Level	250 mV rms
Frequency Range	2 Hz to 250 kHz

Reference Channel

Phase Set Resolution	0.001° increments
Phase Noise at 100 ms TC, 12 dB/octave slope	
Internal Reference	< 0.0001° rms
External Reference	< 0.01° rms @ 1 kHz
Orthogonality	90° ± 0.0001°
Acquisition Time	
Internal Reference	instantaneous acquisition
External Reference	2 cycles + 1 s
Reference Frequency Meter Resolution	4 ppm or 1 mHz, whichever is the greater

Demodulators and Output Processing

Output Zero Stability	
Digital Outputs	No zero drift on all settings
Displays	No zero drift on all settings
DAC Analog Outputs	< 100 ppm/°C
Harmonic Rejection	-90 dB
Output Filters	
Time Constant	10 µs to 100 ks in a 1-2-5 sequence
Slope (roll-off)	
TC ≤ 5 ms	6 or 12 dB/octave
TC > 10 ms	6, 12, 18 or 24 dB/octave
Synchronous Filter	Available for F < 20 Hz
Offset	Auto/Manual on X and/or Y: Å% F.S.
Phase Measurement Resolution	≤ 0.01°
Reference Monitor	TTL signal at current reference frequency, internal or external

Oscillator - General

Frequency	
Range	0.001 Hz to 250 kHz
Setting Resolution	1 mHz
Absolute Accuracy	± 50 ppm
Amplitude	
Range	1 µV to 5 V
Setting Resolution	1 µV when set to less than 1 mV 10 µV when set between 1 mV and 40 mV 250 µV when set between 40.001 mV and 1 V 1.25 mV when set between 1.000001 V and 5 V
Accuracy	± 0.2% typ
Stability	50 ppm/°C
Distortion (THD)	-80 dB @ 1 kHz and 100 mV rms
Output Impedance	50 Ω

Appendix A, SPECIFICATIONS

Sweep	
Frequency	
Output Range	0.001 Hz to 250 kHz
Law	Linear or Logarithmic
Step Rate	1000 Hz maximum (1 ms/step)
Amplitude Sweep	
Output Range	0.000000 to 5.000000 V rms
Law	Linear
Step Rate	20 Hz maximum (50 ms/step)

Auxiliary Inputs

ADC 1, 2, 3 and 4	
Maximum Input	1 V
Resolution	1 mV
Accuracy	P mV
Input Impedance	1 M Ω // 30 pF
Sample Rate	200 kHz maximum (one ADC only)
Trigger Mode	Internal, External or burst
Trigger Input	TTL compatible, rising or falling edge

Outputs

Analog Outputs	
DAC1	X, X1, Mag2, User DAC1, Output function
DAC2	Y, Y1, Pha2, User DAC2, Output function
DAC3	X2, Mag, Mag1, User DAC3, Output function
DAC4	Y2, Pha, Pha2, User DAC4, Output function
Output Functions	Noise, Ratio, Log Ratio and User Equations 1 & 2.
Amplitude	
X(1), Y(1), Mag(1), Pha(1)	5.5 V full-scale; linear to 1% F.S.
User DACs and Output Functions	1.0 V full-scale
Impedance	1 k Ω
Update Rate	
X(1/2), Y(1/2), Mag(1/2), Pha(1/2) @ TC < 1 s	1 MHz
User DACs, Output Functions and T ϵ 's1 s	1 kHz
8-bit Digital Port	
Mode	0 to 8 lines can be configured as inputs, with the remainder being outputs
Status	Each output line can be set high or low and the status of each input line read
Power - Low Voltage	M V at 100 mA 5-pin 180°DIN connector on rear panel for powering compatible preamplifiers

Data Storage Buffer

Size	100,000 data points max.
Max Storage Rate	
Fast Mode	1 MHz (X1, Y1, X2, Y2, ADC1, Demod I/P 1, Demod I/P 2)
Normal Mode	1 kHz

User Settings

Up to 8 complete instrument settings can be saved or recalled from memory as required

Interfaces

USB 2.0, Ethernet, and RS232 allow complete control of instrument settings, and data readout.

General

Power	
Voltage	110/120/220/240 VAC
Frequency	50/60 Hz
Power	40 VA max
Dimensions	
Width	15½" (390 mm)
Depth	7¼" (185 mm)
Height	
With feet	7¼" (185 mm)
Without feet	6½" (170 mm)
Weight	12.8 lb (5.8 kg)

All specifications subject to change without notification

Anexo H: Catálogo láser.

ALPHALAS GMBH
BERTHA-VON-SUTTNER-STR. 5
D-37085 GÖTTINGEN
GERMANY

TEL +49 - (0)551 - 77 06 147
FAX +49 - (0)551 - 77 06 146
E-MAIL INFO@ALPHALAS.COM
WEB WWW.ALPHALAS.COM

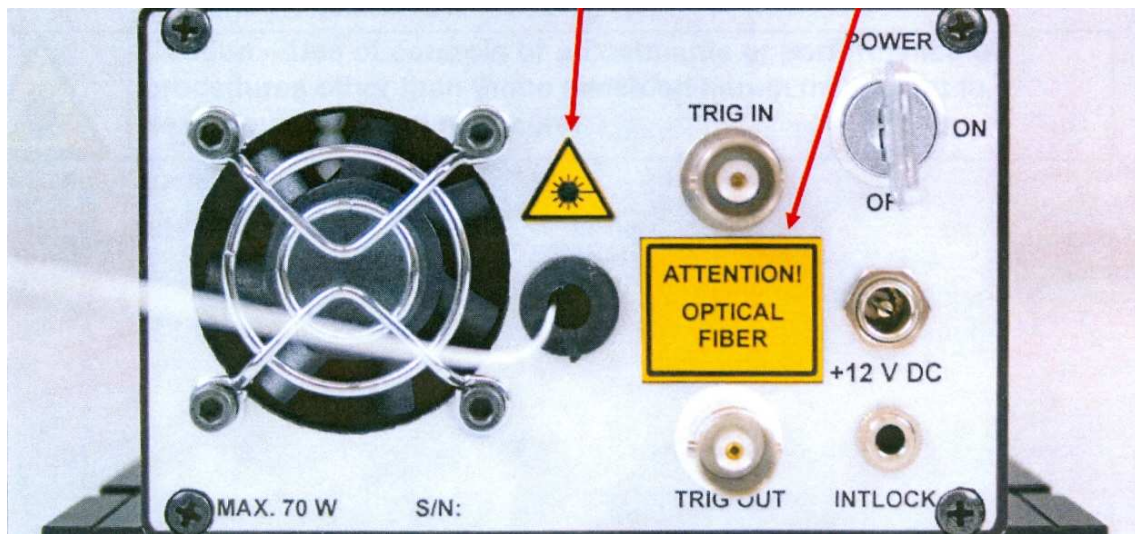


LASERS, OPTICS, ELECTRONICS. MADE IN GERMANY.

FIBER-COUPLED LASER DIODE WITH DRIVER AND TEC CONTROLLER **LDF-10 Series** OEM PRODUCT



OPERATOR'S MANUAL



Max. Avg. Power: 15 W*
Max. Peak Power: 15 W*
Pulse Duration: 10 μ s - CW
Beam Divergence: ≤ 0.4 rad
Wavelength: 700 - 1100 nm*

